



發行人：黃世建

本期主編：楊卓諺、汪向榮

發行所：財團法人國家實驗研究院

國家地震工程研究中心

地址：台北市辛亥路三段 200 號

電話：(02) 6630-0888

傳真：(02) 6630-0858

網址：<http://www.ncee.org.tw>

106 年 9 月出版

81 年 3 月創刊・季刊

目錄

● 專題報導：先進被動控制技術

實尺寸黏彈性阻尼器之超越設計
性能研究 1

傾斜滑動支承之試驗與分析 3

動態特性控制最佳化之自體調諧質量
阻尼設計 4

高阻尼橡膠支承墊於平面非比例運動之
試驗與分析 5

週期性材料於結構基礎之減震應用 6

高性能阻尼器與隔震器實驗設施 7

先進實驗技術發展與驗證平台 - 小型結構
實驗室 8

● 中心活動

臺南實驗室開幕啟用典禮暨研究合作專家
學者論壇 9

MTS 全球地震工程使用者會議 10

● 研討會

結構抗震與健康監測新技術研討會 11

專題報導

《先進被動控制技術之一》

實尺寸黏彈性阻尼器之超越設計性能研究

一、前言

黏彈性阻尼器因同時具備有勁度與消能能力，現今已廣為工程上所應用，其應用範疇除消散能量以降低結構反應外，更可以透過阻尼器的勁度，有效地提升高樓結構物的抗風能力。在實務設計上，目前皆以黏彈性阻尼器未損傷時之力學特性，作為結構消能減震的設計依據。然而，現今卻鮮少有工程師或是學者，探討當結構物經歷大地震時，黏彈性阻尼器在承受超越其設計變位的變形後，黏彈性材料所產生的損傷，對於其阻尼器性能之影響；再者，當大地震過後，結構物遭遇餘震時，阻尼器所能夠發揮的效能亦無從得知。為了對於上述疑慮進行深入探討，本研究採用三組具有相同設計參數的實尺寸黏彈性阻尼器，於本中心高性能消能元件測試系統進行試驗探討(如圖一所示)，並且採用分數微分模型，透過數值回歸方式，對於阻尼器損害前、後、以及過程中之行為進行模擬與分析。



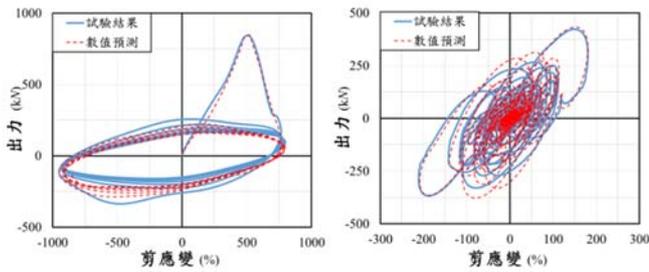
圖一 實尺寸黏彈性阻尼器受測試體與測試系統

二、試驗規劃、結果與討論

試驗規劃上，首先在材料剪應變小於 300% 的前提下，透過一系列包含不同頻率、振幅、溫度的反覆正弦波加載試驗，以充分掌握黏彈性阻尼器於完好狀態下的性能表現。同時，透過數值演算的方法，回歸出可代表阻尼器力學行為的分數微分公式；此公式中含有四個變數，分別考量環境溫度、運動過程中溫度上升、材料軟化、以及高速運動下應變硬化等效應。接著，於控制溫度為 20°C 的環境下提高試驗的剪應變，以測試阻尼器材料發生損傷及極限狀態下的剪應變值，並且觀察其相應的受損程度。大剪應變試驗控制的剪應變值包括 480%、600%、720%、840%、960%、以及 1000%。除此之外，為了解阻尼器性能與損傷程度之關聯，及歷經大地震後之殘餘性能，於每項大剪應變試驗間，皆在相同的控制溫度下，進行原先剪應變小於 300% 的性能試驗，並且將試驗結果重新進行分數微分公式的參數回歸，依據結果比較各組大剪應變試驗後的性能差異。最後，對阻尼器進行地震擾動試驗。試驗流程為，將含黏彈性阻尼器之結構物數值模型，經由地震擾動輸入後，分析相應位置的阻尼器出力與變位歷時，再將變位歷時輸入至測試系統進行試驗。取試驗結果所得到的阻尼器真實出力歷時，與分析模型的出力結果進行比對，以驗證阻尼器分數微分模型的正確性與準確度。

將包含大剪應變反覆正弦波加載試驗以及實際受震反應試驗之試驗結果與數值預測結果繪於圖二，由圖二(1)中之試驗結果可以觀察出，當剪應變大於 600%時，出力值會發生較明顯的變化，因此可以由此判定當剪應變超過此值後，材料會發生損傷；同時由圖二(2)中亦可驗證數值模型具有非常可靠的準確性，不但於非損傷之初始階段有非常好的準確性，更可以反應出材料發生損傷的瞬間以及損傷過後其性能的折減。若更進一步分析大剪應變試驗間的性能試驗參數回歸結果，可以得知當剪應變大於 600%時，其等效勁度及阻尼比會開始隨著剪應變的增加呈現線性下降，直到剪應變達到 840%後，等效勁度與阻尼比皆只剩下約初始狀態的一半值，而此時若再進行更大的剪應變試驗(例如 1000%)，此值亦不再有明顯改變。

另外值得注意的是，當阻尼器承受大剪應變時，由圖二(1)中第一個的循環可以看出，其初始加載階段會有應變硬化的現象，且此現象會隨著加載振幅及頻率之增加而愈發強烈，本研究亦初步提出可模擬此現象的數值預測方法。雖然其作用時間短暫，但在工程應用上必須非常注意，以免阻尼器與結構間之連接構材，或是局部梁、柱等構件發生非預期的破壞。

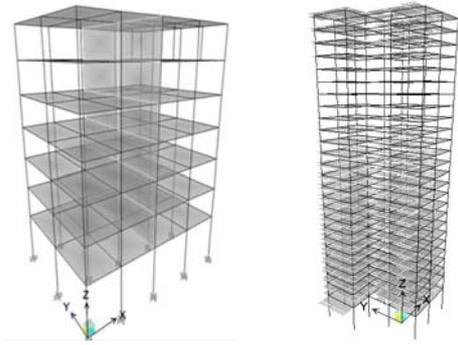


(1) 840%剪應變循環試驗 (2) 地震擾動試驗
圖二 試驗結果與數值分析預測比較

四、設計案例分析與應用探討

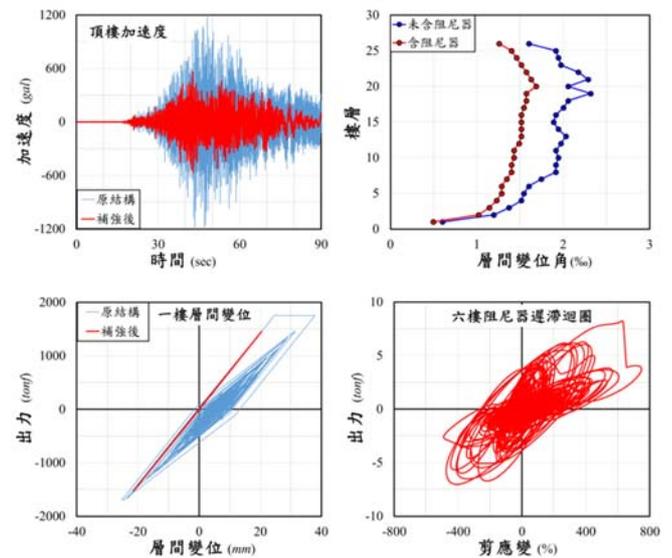
本研究最後以兩組不同結構物的數值模型，以數值分析結果，驗證採用分數微分模型的黏彈性阻尼器，其應用於結構物上的減震效益。第一組結構物為台灣常見的老舊型七層樓街屋，此種結構通常具有挑高且軟弱的一樓，故於一樓之兩個水平主軸方向，各安裝兩組 50 噸之黏彈性阻尼器以對結構物進行補強；第二組結構物為新建之 26 層樓鋼筋混凝土住宅大樓，於三至十九樓，每層樓在一水平主軸方向皆安裝有四組 50 噸的黏彈性阻尼器，以提升結構物的耐震能力。

然而由於目前市面上之商用結構分析軟體尚未有計算分數微分公式的功能，故分析上先以 ETABS 軟體進行模型建置(如圖三所示)，同時於模型中依據構件配筋之形式設置塑鉸，再透過非線性靜力側推分析了解每一樓層的結構塑性行為，最後再將每一個樓層簡化為單一質點、單一自由度的棒狀模型(Stick Model)，以此應用於 MATLAB 軟體中與黏彈性阻尼器的分數微分公式一同進行非線性動力歷時分析。其中對於第二組高樓結構物之數值模型，於 ETABS 側推分析階段時，讀取側推方向上兩側結構邊緣柱之垂直向長度差異值以及樓層彎矩值，由此計算樓層之旋轉勁度，並將其以旋轉彈簧之形式模擬在棒狀模型中。



(1) 七層樓之老舊街屋 (2) 26 層之高樓住宅
圖三 結構物數值模型

如圖四(1)所示，安裝黏彈性阻尼器之老舊七層樓街屋，於 921 集集地震中，正規化至地表最大加速度為 240 gal 的 CHY054 測站紀錄地震歷時擾動下，原結構一樓會產生將近 1% 的層間變位角及明顯的結構塑性行為，經黏彈性阻尼器進行補強後，於阻尼器發揮約 400% 的剪應變下，一樓結構便不再產生塑鉸；同時，結構物的頂層加速度反應，不但不會因為阻尼器的勁度使其值增加，反而因為消能能力的提升，使得頂層最大加速度折減約 59%。另外由圖四(2)中可以看出，26 層之高樓住宅結構，於 921 集集地震中，正規化至地表最大加速度為 320 gal 的 TCU067 測站紀錄地震歷時擾動下，黏彈性阻尼器的剪應變高達 610%，且於遲滯迴圈中可以觀察到，阻尼器出力值在最大應變發生過程中，有明顯的下降；同時，可以看出在小變位時，有兩種不同等效勁度的遲滯迴圈，即為發生損壞前後阻尼器力學行為上的差異。另一方面，比較安裝阻尼器前後的層間變位角，可以得知即使阻尼器因大變位而發生損壞，在最嚴重狀態下仍然可以維持原先約 50% 的性能，故仍然具有一定程度上的減震消能能力。



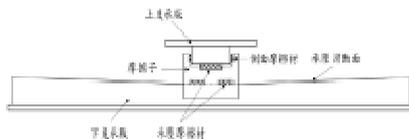
(1) 七層樓老舊街屋 (2) 26 層之高樓住宅
圖四 結構補強及減震效益分析結果

台灣大學博士候選人 游忠翰、專案佐理研究員 邱宜甄
研究員 汪向榮、台灣大學教授 張國鎮

傾斜滑動支承之試驗與分析

一、前言

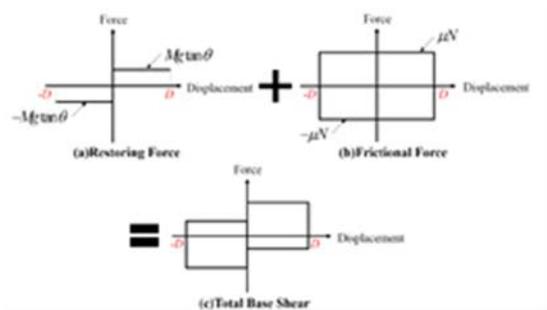
傾斜滑動支承主要由上支承版、下支承版及摩擦子所組成，其示意圖如圖一所示。其中上支承版與上部結構相連，下支承版則與下部基礎相接。摩擦子介於上、下支承版之間，其與上、下支承版滑動面之接觸材料將決定滑動類隔震支承中最重要之參數——摩擦係數。由於摩擦係數對隔震系統之隔震層位移及隔震效果有決定性之影響，故摩擦材之選用尤為重要，一般除了要求摩擦材具有較低的摩擦係數之外，還需具有承受上部結構自重之能力，同時亦需具有耐磨、耐高溫之特性。由於傾斜滑動支承之滑動面為一斜面，故當系統位於斜面上時，上部結構之自重即會產生一將系統拉回支承原點位置之回復力。本研究先藉由理論推導獲得運動方程式，接著以參數分析，解析摩擦係數及斜面角度對系統動力行為的影響。最後再以振動台試驗，進行實驗結果與理論模擬之擬合。



圖一 斜面滑動支承

二、運動方程式推導與參數分析

為了簡化推導過程，本研究先進行了幾項假設，簡單說明如下：(1)假設摩擦子與支承版為理想化接觸，且為純滑動之行為；(2)支承兩方向之滑動行為完全相同；(3)滑動摩擦行為的模擬，採用庫倫摩擦模型；(4)忽略於斜面切換點所產生的碰撞效應；(5)不考慮垂直向地表加速度；(6)忽略由水平向地表加速度因斜面分量對正向力的影響。基於上述幾項假設，藉由拉格朗日方程式與能量定理，可推導獲得斜面滑動支承之水平向運動方程式。由理論推導可發現，斜面滑動支承於隔震後所上傳之加速度為一常數，且其大小由斜面角度與摩擦係數所控制，與所輸入地表加速度大小及頻率內涵無關。其所呈現之遲滯迴圈，可視為一簡化之雙旗桿遲滯模型，這樣的力學行為，可輕易地藉由土木工程領域常接觸的結構分析軟體如 ETABS 與 SAP2000 模擬，惟需適當選擇非線性元件中的多線性彈性與塑性模型進行組合(圖二)。



圖二 簡化雙旗桿遲滯模型

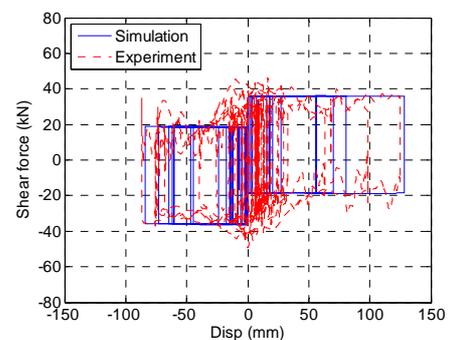
由簡諧外力下之參數敏感度分析，經斜面滑動支承隔震後上傳之加速度與斜面角度及摩擦係數呈正相關。較大的斜面角度，將導致有較大的隔震位移，故需適當的增加摩擦係數以控制隔震位移。此外，位移反應的大小與簡諧外力的頻率呈負相關。類似的趨勢，在隔震後的加速度反應也同樣可觀察到。針對殘餘位移的模擬結果也可看出，斜面滑動支承具備良好的自復位能力。

三、振動台試驗與擬合

於振動台試驗中，針對隔震後之上部結構分別考慮剛體(以質量塊模擬，試體 1)以及非剛體(以三層樓鋼構架模擬，試體 2)，詳細試體組裝完成圖請參考圖三。兩上部結構試體總重，皆控制在 $34 \text{ kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ 。其中試體二於水平 X 與 Y 向之基頻，經識別後之結果為 10.5 與 4.1 Hz。斜面滑動支承之斜面角度設計為 1.5 度，摩擦係數為 0.08。測試地表加速度，採用 El Centro、Kobe、Tohoku、Kokuji、Kumamoto、Chi-Chi 與 Meinong 等七筆地震，並考慮不同震度，進行水平單向與水平雙向測試。由試驗結果發現，隔震後上部結構之加速度反應，確實可有效地被控制於一常數(圖四)。此外，隔震後之殘餘位移也相當有限。



圖三 試體安裝



圖四 測試結果與擬合

藉由與實驗數據之擬合，可驗證由理論推導所獲得之運動方程式(圖四)。由圖中不難看出，數值模擬的結果，不論在位移或加速度，皆與實驗量測結果相符，故證明由理論所建立之運動方程式，具備足夠之精度來模擬斜面滑動支承之動力行為。

助理研究員 楊卓諺、台灣大學研究生 林致寬
研究員 汪向榮、副主任 鍾立來
台灣大學教授 張國鎮

動態特性控制最佳化之自體調諧質量阻尼設計

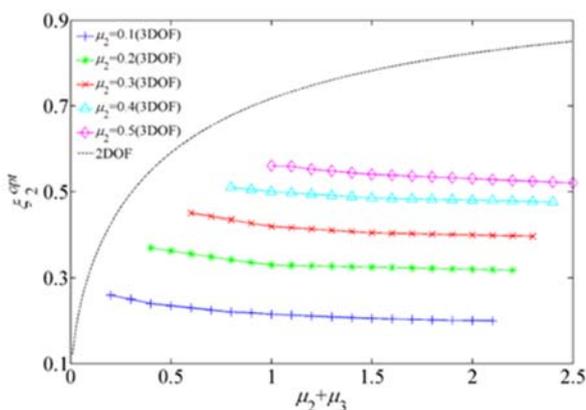
一、前言

為了克服傳統調諧質量阻尼(Tuned Mass Damper, TMD)設計中,因調諧質量比過小而導致主要結構之減震效益相當有限,因此,本研究提出一新的設計概念,稱為自體調諧質量阻尼(Building Mass Damper, BMD)設計。利用結構本身部分質量,而非以額外增加質量的方式作為能量吸收器,並提出一最佳的自體調諧質量阻尼(OBMD)設計方法,即動態特性最佳化控制方法,期能同時降低上部結構(或調諧質量)與下部結構(或主要結構)的受震反應,進而有效保護結構與重要設備。調諧質量所需之勁度與阻尼,則分別由天然橡膠支承墊與線性黏性阻尼器組成之控制層所提供。

二、分析模型與最佳化目標函數

首先,以一簡化三自由度(3DOF)結構模型,模擬一採用 BMD 設計之建築結構,三個集中質量分別位於下部結構、控制層與上部結構。利用狀態空間分析方法,且假設模態耦合,可得到 3DOF 結構模型之系統矩陣,其可以標稱頻率 ω_i 、頻率比 $f_i = \omega_i / \omega_1$ ($i = 2, 3$)、質量比 $\mu_i = m_i / m_1$ ($i = 2, 3$)以及阻尼比 ξ_i ($i = 1 \sim 3$)表示之,其中, $i = 1$ 至 3 分別代表下部結構、控制層以及上部結構;標稱頻率 ω_1 、 ω_2 與 ω_3 分別定義為 $(k_1/m_1)^{1/2}$ 、 $[k_2/(m_2 + m_3)]^{1/2}$ 與 $(k_3/m_3)^{1/2}$ 。

決定 OBMD 設計參數之目標函數,是將三個複數振動模態中的模態阻尼比,控制為一近似相等值。在過去多數 TMD 相關研究中,通常使用簡化二自由度(2DOF)結構模型,進行 TMD 最佳化設計參數之研究,在這種條件下,僅有一個質量比參數需要被定義,即本研究 μ_2 與 μ_3 之和。如圖一所示,當使用 2DOF 結構模型時,質量比越大,所需的阻尼設計需求則越高。然而,當使用 3DOF 結構模型時,則觀察到最佳化阻尼比與 μ_2 及 μ_3 之和成反比,此趨勢與過往使用 2DOF 結構模型所得之結果正好相反,但其仍與 μ_2 成正比。更重要的是,當 μ_2 比較小時,使用 3DOF 結構模型可以獲得更為合理且可行之設計阻尼比。



圖一 2DOF 與 3DOF 結構模型所得之最佳化設計阻尼比

二、試驗與數值分析結果

振動台試驗驗證之空構架(Bare)結構試體,為一考慮 1/4 比例

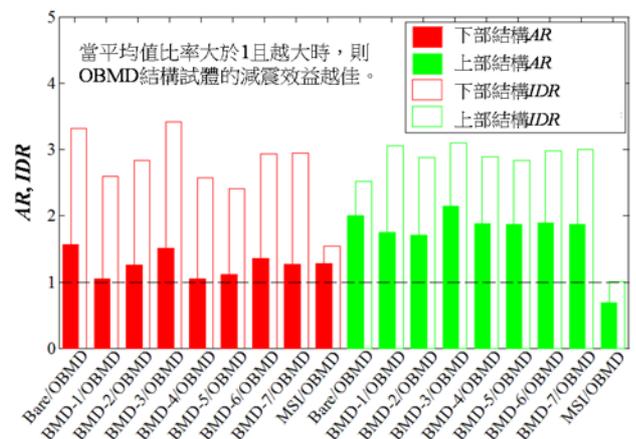
縮尺之八層鋼結構模型,為了研究 f_2 、 f_3 與 ξ_2 變化對於 BMD 設計參數以及控制效益之影響,共規劃了七組 BMD 結構試體(BMD-1 至 BMD-7),以及一組 OBMD 結構試體,如圖二所示,控制層均設計在四層。試驗輸入之震波,採用 El Centro、Kobe、Chi-Chi 與 Tohoku 地震分別在 I-ELC270、KJM000、TCU047 與 THU 測站記錄之地表加速度歷時,同時考慮不同震度。



圖二 振動台試驗結構試體與數值分析模型

為了進一步比較 OBMD 設計的減震效益,以相同之八層鋼結構模型,設計一合理的中間層隔震建築,其隔震層亦設計在四層,其於後文均以 MSI 表示之,如圖二所示。

為了比較空構架結構試體、BMD 結構試體、OBMD 結構試體與 MSI 結構模型之耐震行為優劣,統計在不同震波下,空構架結構試體、BMD 結構試體與 MSI 結構模型相較於 OBMD 結構試體之下部與上部結構最大加速度平均值比率(AR)及最大層間位移平均值比率(IDR),如圖三所示。由圖中可發現,OBMD 結構試體與 MSI 結構模型的耐震性能,遠遠優於空構架結構試體以及 BMD 結構試體;OBMD 結構試體與 MSI 結構模型的減震效益幾乎不相上下,甚至 OBMD 結構試體在下部結構的減震效果更為出色。此外,OBMD 結構試體位於控制層之層間位移反應,遠遠小於 MSI 結構模型之隔震層位移反應,足以證明此兩種設計方法在根本上與控制目標上並不相同。



圖三 試驗與數值分析結果比較

研究員 汪向榮、助理研究員 李柏翰

台灣大學教授 張國鎮

高阻尼橡膠支承墊於平面非比例運動之試驗與分析

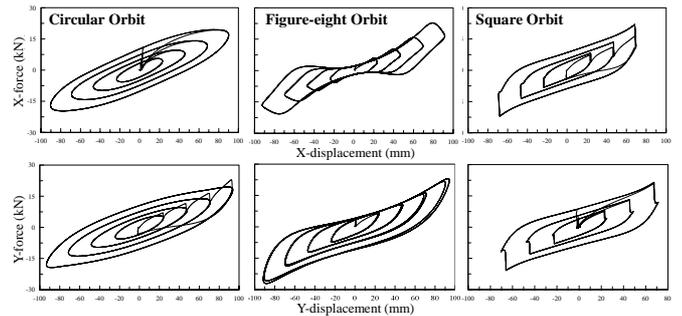
一、前言

高阻尼橡膠支承墊於單軸向反覆加載與雙軸向平面非比例軌跡運動條件下，過去鮮少針對兩者遲滯行為之差異進行深入探討，此差異極可能導致不保守之實務設計結果。因此，本研究將採用縮尺高阻尼橡膠支承墊，分別進行單軸向反覆加載試驗與雙軸向平面非比例軌跡運動試驗，藉由探討不同加載形式下之遲滯行為，提出一修訂數學分析模型，進而可提升模擬高阻尼橡膠支承墊真實遲滯行為之準確性，並確保實務設計之保守性。

二、試體介紹與試驗程序

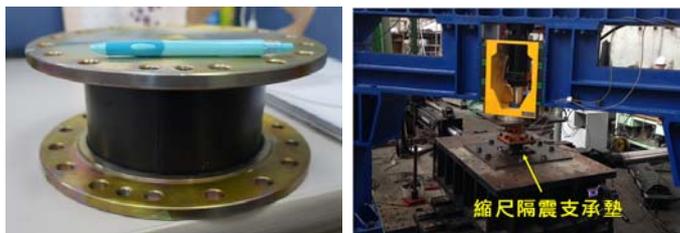
本研究規劃於三軸向動態縮尺試驗設施，進行高阻尼橡膠支承墊於單軸向反覆加載試驗，以及雙軸向平面非比例軌跡運動試驗，如圖一所示。採用之縮尺高阻尼橡膠支承墊直徑為 150 mm，由 25 層厚度為 1.97 mm 之橡膠層及 24 片厚度為 1.2 mm 之鋼板積層交疊組成，包含上下轉接板的整體總高度為 102.1 mm。試體鎖固於垂直向動態油壓致動器與水平雙向滑動平臺間，在垂直向軸壓應力為 50 kg/cm²，以及考慮不同試驗振幅與測試頻率的條件下，分別進行正弦波(Sinusoidal)與三角波(Triangular)之單軸向反覆加載試驗，以及圓形(Circular)、八字形(Figure-eight)與正方形(Square)之雙軸向平面非比例軌跡運動試驗，如圖二所示。假設平面運動軌跡路徑於兩相互正交水平主軸之位移分量(隨時間 t 變化)分別為 U_x 與 U_y ，且 U_0 為位移振幅，則可得知圓形、八字形與正方形平面運動軌跡路徑之最大位移向量和分別為 U_0 、 $((U_x^2+U_y^2)^{1/2})_{\max}$ 與 $2^{1/2}U_0$ 。

之增加，進而導致等效阻尼比隨之降低。再者，由圖三所示，透過雙軸向平面非比例軌跡運動試驗結果可以發現，其遲滯行為與單軸向反覆加載試驗結果具有相當顯著之差異，主要原因來自於扭轉耦合效應之影響。當高阻尼橡膠支承墊受到平面運動時，平面加載之水平力可分解為兩相互正交之 X 與 Y 軸方向分量，其剪應變將不再沿著兩相互正交之水平主軸上均勻分布，造成高阻尼橡膠支承墊局部之剪應變增加，進而導致其遲滯行為更加複雜且具有不可預測性。

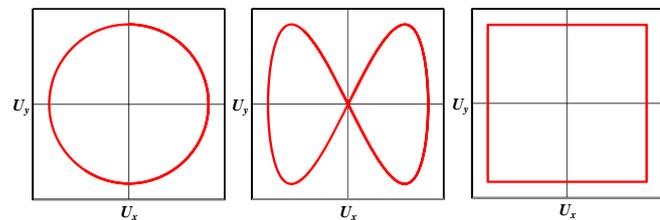


圖三 雙軸向平面非比例軌跡運動之遲滯迴圈試驗結果

過去研究已提出一具 10 個待定係數之數學分析模型，用以模擬高阻尼橡膠支承墊之遲滯行為。然在單軸向三角波反覆加載時，其速度歷時為階躍函數，則無法以此模型準確模擬高阻尼橡膠支承墊之遲滯行為。故考慮數學分析模型之適用性以及參數之合理性，本研究提出一具 9 個待定係數之修訂數學分析模型，亦根據平面向量之觀念，將其延伸用以模擬高阻尼橡膠支承墊於平面非比例軌跡運動下之遲滯行為。如圖四所示，根據試驗結果與數值預測結果比較可知，本研究提出之修訂數學分析模型，可以準確模擬其於不同加載條件下的遲滯行為，即使 9 個待定係數是由不同的試驗條件求得，足見此模型具有相當之廣義性與代表性。



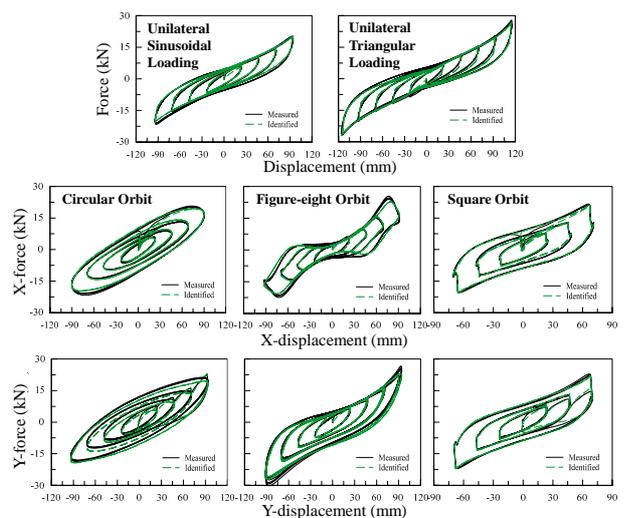
圖一 縮尺高阻尼橡膠支承墊與三軸向動態縮尺試驗設施



圖二 平面非比例運動軌跡圖

三、試驗結果與數值分析探討

根據縮尺高阻尼橡膠支承墊於單軸向反覆加載試驗結果比較可發現，除了在加載轉換為卸載之臨界階段外，其遲滯迴圈並未明顯受到不同載重形式與加載速度之影響，皆具有一致之遲滯行為。透過試驗結果亦可得知，隨著測試頻率的增加，等效勁度隨



圖四 試驗結果與數值分析之遲滯迴圈比較

助理研究員 林旺春

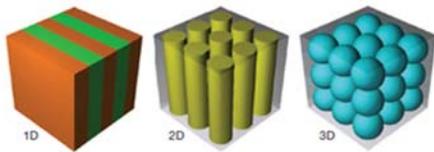
研究員 汪向榮

台灣科技大學教授 黃震興

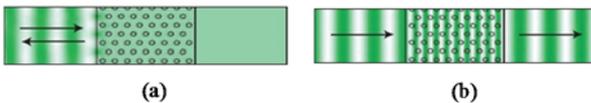
週期性材料於結構基礎之減震應用

一、前言

過去針對週期性材料的相關研究指出，無限延伸之晶格層(lattice layer)設計，具備阻隔某些特定彈性波傳遞的特性。依其單元(cell)重覆堆疊的方向，週期性材料或聲子晶體(phononic crystal)可分類為一維(1D)、二維(2D)與三維(3D)設計，如圖一所示。這類的合成材料，能夠阻擋某些特定頻率範圍之彈性波傳導，此頻率範圍稱為頻率帶寬間隔(frequency band gap)或衰減區(attenuation zone)。圖二(a)顯示，當彈性波的頻率落在頻率帶寬間隔內，則此彈性波無法藉由聲子晶體進一步傳遞。反之，當彈性波的頻率落在頻率帶寬間隔外，則可穿過聲子晶體繼續傳遞(圖 2(b))。

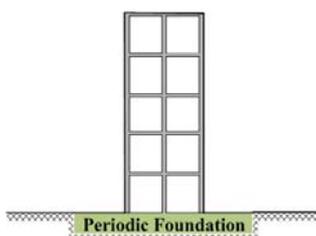


圖一 聲子晶體之堆疊分類

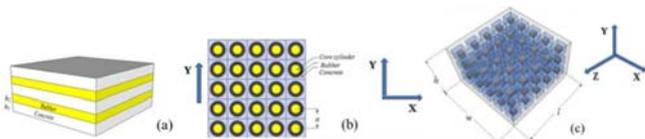


圖二 聲子晶體之頻率帶寬間隔與波傳示意圖

有鑒於聲子晶體的獨特特性，土木工程領域的學者也嘗試將其應用到結構元件當中。本研究將聲子晶體應用至重要結構之基礎，用以隔絕地震波，降低上部結構之受震反應(圖三)，其稱之為週期性基礎(periodic foundation)。同樣的，此一週期性基礎也可分類為一維(1D)、二維(2D)與三維(3D)設計，分別如圖四(a)、(b)與(c)所示。



圖三 週期性基礎



圖四 週期性基礎分類

二、試驗配置

藉由不同試驗，分別針對一維、二維與三維之週期性基礎，受到環境振動、簡諧地表加速度與地震波作用下之減振效果進行

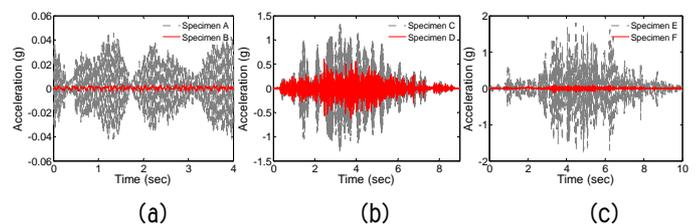
驗證(圖五)。試體 A 採三層鋼結構模型直接鎖固於振動台上；試體 B 則於其底部與一維週期性基礎相連後，再安裝於振動台上。試體 C 將鋼構架直接安裝於混凝土基礎上；試體 D 則在鋼構架與混凝土基礎之間放置了一個二維週期性基礎。此外，在三維週期性基礎的試驗中，則以一混凝土之懸臂柱作為上部結構，並考慮該上部結構直接安裝於混凝土基礎(試體 E)，以及安裝於三維週期性基礎(試體 F)。



圖五 試體組裝

三、試驗結果

由圖六(a)的結果顯示，與環境振動下的試體 A 相比，試體 B 之頂部的加速度顯著降低。環境振動的主要頻率為 50 Hz，其符合試體 B 所設計一維週期性基礎的第四衰減區，頻率範圍為 46.1-60 Hz 之間，故輸入波會被減弱。在二維週期性基礎的實驗測試中，以修正後的地表加速度(BORAH.AS/HAU000 (1983/10/29))作為輸入，修正後之地震波主要頻率位於 46 Hz，其落在二維週期性基礎的衰減區域內(試體 D)。圖六(b)試驗結果顯示，不考慮二維週期性基礎的試體 C，最大加速度為 1.34g。倘若以同樣地震波輸入，對於採二維週期性基礎之試體 D，其最大加速度為僅為 0.64g，故二維週期性基礎可有效折減 50%以上傳遞至上部結構的加速度反應。試體 E 與 F 也採用同樣的地表加速度作為輸入，在此一試驗中，該地表加速度所具備的主要頻率為 35.1Hz，落在試體 F 所設計三維週期性基礎的衰減區(32.9-35.6Hz)內。由圖六(c)測試結果可清楚觀察到，試體 E 與 F 受到外力激震下，最大加速度分別為 1.73 與 0.1g。因此，三維週期性基礎確實能夠將傳遞至上部結構的加速度反應減少超過 90%，即採用週期性基礎確實能夠有效降低加速度反應。



圖六 試驗結果比較

助理研究員 楊卓諺、休士頓大學博士候選人 Witarto

研究員 汪向榮、休士頓大學教授 莫詒隆

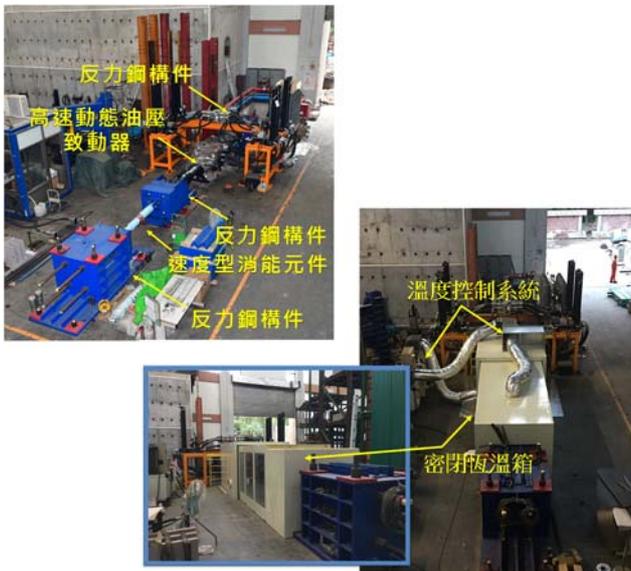
台灣大學教授 張國鎮

高性能阻尼器與隔震器實驗設施

一、高性能消能元件測試系統

國家地震工程研究中心為滿足國內目前與未來的相關研究需求，以及建築物與橋梁工程應用隔減震設計之速度型阻尼器測試需求，於臺北地震模擬實驗室完成規劃與建置一高性能消能元件測試系統，可進行實尺寸速度型阻尼器動態測試，亦可驗證其動態特性與溫度之相依性，如圖一所示。

高性能消能元件測試系統由三組反力鋼構件、一套密閉恆溫箱與溫度控制系統、以及一支高速動態油壓致動器組成，其最大出力為 ± 2 MN，最大位移行程可達 ± 600 mm，以及於最大速度為 ± 1 m/sec 條件下，最大出力可達 ± 1 MN。三組反力鋼構件皆以螺桿施加預力鎖固於強力地板，並以螺桿施加預力接合高速動態油壓致動器、轉接夾具與測試件，可有效減少試驗時所有接合面可能產生的間隙。高速動態油壓致動器前端的反力鋼構件採用線性滑軌設計，以確保高速動態油壓致動器在試驗時能夠保持水平反覆之作動，除可降低對於油封處的磨耗，亦能夠有效降低高速動態油壓致動器作動時產生的摩擦力。與測試件後端接合之反力鋼構件，可依測試件長度靈活調整固定位置。測試件兩端的反力鋼構件，皆有設計轉接夾具及孔位以接合測試件與額外荷重計，試驗中以額外荷重計量測，可排除摩擦力與慣性力的影響。測試件安裝於密閉恆溫箱內，經由溫度控制系統可控制恆溫箱內部溫度達測試需求以進行試驗，其溫度控制範圍可在 $+5^{\circ}\text{C}$ 至 $+50^{\circ}\text{C}$ 之間。

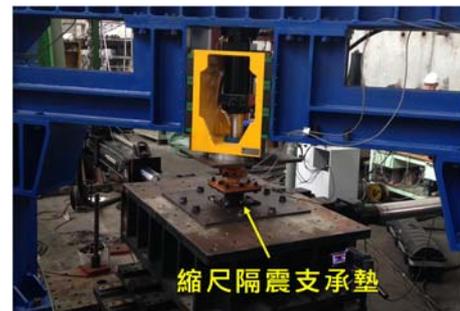
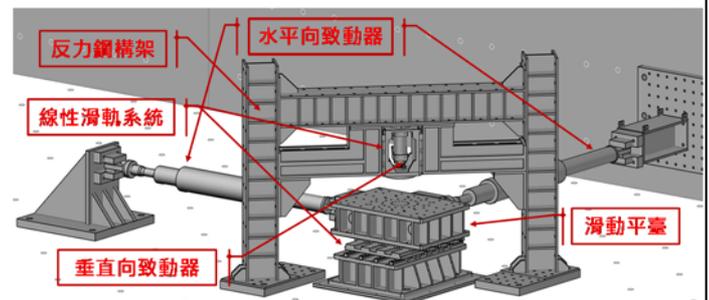


圖一 高性能消能元件測試系統

二、三軸向動態縮尺試驗設施

為了探討縮尺隔震支承於平面非比例運動下之真實力學行為，國家地震工程研究中心於臺北地震模擬實驗室完成設計與建置一三軸向動態縮尺試驗設施，如圖二所示。三軸向動態縮尺試驗設施，主要由一支垂直向動態油壓致動器、二支水平向動態油壓致動器、一座水平雙向滑動平臺與一反力鋼構架所組成。具備三個

自由度(兩水平方向與一垂直方向)控制能力，能同時對測試件進行平面與垂直向加載。垂直向動態油壓致動器的伺服閥流量為 16 gpm，位移行程為 ± 50 mm，拉力與壓力容量分別為 150 kN 與 250 kN，一端部設計有固定測試件或治具的孔位，另一端部則鎖固於反力鋼構架。反力鋼構架以螺桿施加預力鎖固於強力地板，垂直向動態油壓致動器接合於其橫梁下，並設計側向滾柱型線性滑軌機構確保垂直向控制精度，橫梁可因應測試高度需求調整高程位置。二支水平向動態油壓致動器的伺服閥流量皆為 400 gpm，最大出力為 ± 250 kN，最大位移行程可達 ± 250 mm。水平雙向滑動平臺透過於兩水平相互正交方向採用滾柱型線性滑軌設計，以及於兩水平相互正交方向分別與兩水平向動態油壓致動器相互接合，使長寬為 1450 x 1000 mm 之滑動平臺台面可進行平面運動。



圖二 三軸向動態縮尺試驗設施

三、結語

應用建置完成的高性能消能元件測試系統與三軸向動態縮尺試驗設施，可深入瞭解隔減震元件在實際動態擾動下之真實受震表現，並逐步研發更為先進且實用之隔減震技術。同時，可擴大服務國內外之隔減震元件動態試驗研究與測試認證，支援政府主管機關修訂與建立隔減震相關規範與標準，持續為國內工程品質實質把關。

助理研究員 林旺春、楊卓諺、李昭賢

台灣大學博士候選人 游忠翰

副技術師 周志雄

助理技術師 曾建劄、闕慎佑

台灣科技大學助理教授 陳沛清

研究員 汪向榮

先進實驗技術發展與驗證平台-小型結構實驗室

一、前言

近年來，地震工程研究人員對結構模擬與實驗的要求越來越嚴謹，傾向於了解實尺寸結構的真實受震反應。對結構實驗室而言，添增大規模與高性能的新型實驗設備耗費甚鉅，因此發展先進的複合實驗方法是必要的。複合實驗(hybrid simulation)是一種混合數值模擬與實體結構測試之實驗方法，以求取特定結構物在外力作用下之歷時反應。如果實驗以靜態施載方式將計算位移施加於試體上，稱為擬動態實驗方法(pseudo-dynamic testing)；若以動態致動器進行計算位移的即時加載，稱為即時複合實驗方法(real-time hybrid simulation)。國內地震工程實驗室設備出力大，先進實驗技術在發展與驗證的階段，若以大型設備做為實驗技術開發與驗證之平台，稍有不慎，輕則造成儀器試體的損壞，重則釀成研究與技術人員的傷亡。有鑒於此，國家地震工程研究中心於 105 年 6 月獲得科技部推動規劃補助計畫之經費，於台北實驗室 R109 建置了小型結構實驗室，並於 106 年 7 月開始啟用。未來相關研究人員可在安全的環境下研發所需之實驗技術。

二、實驗室軟硬體配置

小型結構實驗室的示意圖如圖一所示，其目前配置之軟硬體簡述如下：

(一) 油壓與控制系統

實驗室具備六支動態油壓伺服致動器，最大衝程為 ± 127 mm，最大出力為 ± 15 kN，最大流量為 15 gpm。實驗室使用 MTS FT-100 數位控制器，可同時進行兩個獨立實驗並控制六支致動器。為了供給油壓致動器穩定的工作油壓，實驗室具備兩組油壓分歧座，並於地下室安裝 MTS SilentFlo 電動油壓泵，可提供 3,000 psi 油壓及最高 60 gpm 的總流量。

(二) 反力牆與反力地板

實驗室具備鋼構造反力地板與反力牆，採整體分析設計與組裝，以進行有限元素模態分析與最大靜力加載分析後完成設計。兩座反力牆的高度分別 2.0 m 與 1.5 m，寬度分別為 3.5 m 與 4.5 m，模態分析第一共振頻率分別為 55.08 Hz 與 100.35 Hz，測試試體或轉接板可使用 M 20 及 M 12 螺栓與反力牆進行接合。反力地板為兩鋼板焊接組合而成，尺寸為 4.85 m x 4.35 m，測試試體或夾具可使用 M12 及 M10 螺栓與地板進行鎖固。

(三) 材料試驗機

實驗室設置一座 MTS 810 材料試驗機，材料試驗機最大衝程為 ± 75 mm，最大出力為 ± 100 kN，最大流量為 15 gpm，可供精密與關鍵設備組件進行相關材料實驗。材料試驗機具備夾持試片之楔形塊，可進行動態反覆疲勞載重實驗。

(四) 即時運算機器

實驗室具備了三種不同的即時運算機器：(1)dSPACE 的 MicroLabBox、(2)MathWorks 的 xPC Target，以及(3)National Instruments(NI)的 PXI 系統，其中 xPC Target 與 PXI 搭載光纖共享記憶體(SCRAMNet)，可透過光纖與 MTS FT-100 數位控制器直接進行數據交換，提供實驗運算資料傳遞的一種方式。

(五) 圖形處理單元加速運算電腦

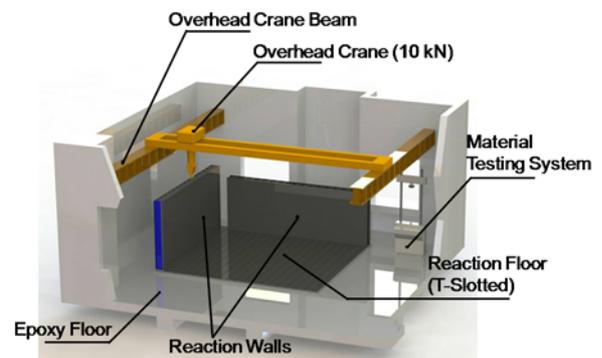
為了能夠以高性能進行非線性數值模型之計算，實驗室具備基於圖形處理單元的高性能數值計算引擎，藉由平行有限元素計算方法，透過多執行緒提高有限元結構分析的計算效率，加速數值運算的速度，使即時運算機器能有較多的時間進行致動器的補償計算與位移加載。

(六) 資料擷取系統

小型結構實驗室具備 32 通道的 MTS FlexDAC 資料蒐集器，可集錄 1/4 橋、半橋與全橋式量測儀器的訊號。此外，前述的 NI PXI 系統亦可做為資料蒐集之用，最多可支援集錄 88 通道的類比訊號。

(七) 應用軟體

小型結構實驗室目前具備 MTS 793 控制軟體，可進行油壓致動器的校正與調適。此外亦具備 NI VeriStand 與 LabVIEW，可迅速建立測試單元控制，並編寫資料擷取、測試程序、與系統整合等。



圖一 小型結構實驗室示意圖

三、未來工作

未來擬藉由與國內外學術界共同開發先進實驗技術，包括多自由度油壓致動器精確的即時控制、數值演算法的應用、平行或多工運算技術、模型參數即時修正技術、跨系統整合技術、資料傳遞與儲存技術等、非接觸型實驗量測與分析技術等，除了滿足國內產官學界地震工程測試驗證之需求外，並使我國地震工程先進實驗技術與研究成果享譽國際。

台灣科技大學營建工程系助理教授 陳沛清

臺南實驗室開幕啓用典禮暨研究合作專家學者論壇

國研院國震中心臺南實驗室於 2017 年 8 月 9 日由國震中心及成功大學共同舉辦開幕啓用典禮，由科技部陳良基部長親自主持揭牌儀式，立法委員王定宇、成功大學蘇慧貞校長、陳東陽副校長、國研院王永和院長、吳光鐘副院長、國震中心黃世建主任與其他多位產官學研特邀貴賓參與，總計約有 350 位國內外來賓觀禮共同見證我國地震工程技術發展的重要里程碑。



科技部陳良基部長於 8 月 9 日開幕式致辭

長衝程高速度地震模擬振動台、解析近斷層地震利器

臺灣地震頻繁且斷層密布，鄰近斷層區域受到具有高速度脈衝及大位移特性的地震波影響，如用毛巾一般，會對結構物造成極大損害。現今全台約有 250 萬棟建物、超過 860 萬人住在活動斷層兩側 10 公里內，持續遭受「近斷層地震」的威脅，然而過往我國並無相關設施可模擬近斷層地震效應。為深入探討臺灣近斷層地震特性，發展適切的耐震技術，在科技部、國家發展委員會、國家實驗研究院與成功大學共同努力下，歷時三年於成功大學歸仁校區興建完成「國研院國震中心臺南實驗室」。本實驗室擁有「長衝程高速度地震模擬振動台」與「雙軸向動態試驗系統」兩大高性能實驗設施；「長衝程高速度地震模擬振動台」係因應臺灣地震頻繁且部分斷層通過人口密集區之環境特點所設置，其性能為目前全球首屈一指，可協助學者專家了解結構物在遭受高速度脈衝與大位移近斷層地震效應之反應，針對臺灣地震特性發展本土化耐震技術。另，「雙軸向動態試驗系統」則為滿足產業界與學研界對於隔震元件日漸增加的測試與研發需求而設置，是目前亞洲唯一、世界唯三可進行足尺寸隔震元件動態測試之設備，能驗證隔震元件受近斷層地震作用下之動態行為。未來我國產業將可在國內完成產品驗證，無須再送至國外測試，有效降低國內隔震結構興建成本與工時，並確保其優異品質；此外，將結合先進實驗技術，使我國在隔震技術發展居世界領先地位。

8 月 9 日上午典禮當天，「長衝程高速度地震模擬振動台」以震度達 7 級之地震紀錄，對二分之一縮尺的三層樓鋼筋混凝土構架進行耐震測試，模擬在近斷層地震效應影響下，底層挑高類型建築（例如商辦、賣場或消防廳舍等）之結構破壞行為。而「雙軸向動態試驗系統」則對常用於隔震結構之高阻尼橡膠支承墊，施以大位移之反覆剪動位移，演示地震發生時隔震元件作動過程，充分展示該測試系統具備之高速度與大位移優異性能。

國際論壇、跨世代菁英齊聚

國震中心及成功大學土木系於 8 月 9 日下午及 8 月 10 日全天共同召開國際研究合作專家學者論壇，就：(i) 近斷層及複合災害(地震、颱風、洪水、火災等)影響下之結構安全評估暨防減災對策研擬、(ii) 創新實驗技術及電腦分析模擬方法、(iii) 歷史災害性地震震損原因探討及防減災對策等 3 個關鍵議題進行研討及意見交流；總計有來自美國 (26 人)、日本 (21 人)、南韓 (5 人)、印度 (4 人)、中國大陸 (3 人)、新加坡 (2 人)、加拿大、紐西蘭、澳洲、智利、印尼、捷克、義大利、科威特、俄羅斯 (以上各 1 人) 以及台灣，總計約 235 位來自產學研各界菁英與會，共同勾勒未來地震工程及複合災害研究藍圖。正式總結報告白皮書經彙整完成後將公布於開幕啓用論壇專屬網站 <http://go.ncree.org/gof/>。另，國震中心與美國 MTS 公司透過簽署備忘錄就未來創新實驗技術研發建立策略合作伙伴關係，並於 8 月 7 日至 8 日假遠東香格里拉飯店國際會議廳共同主辦第一屆 MTS Worldwide Seismic Solutions Users Group Meeting，美國 MTS 公司未來就地震工程實驗技術發展每 3 年辦理一次全球使用者會議。



美國國家工程院院士及加州大學柏克萊校區講座教授 Jack Moehle 博士於 8 月 9 日開幕啓用國際論壇進行特邀演講，講題：Earthquake Simulation and Near-Fault Ground Motions

產學研通力合作、解決我國耐震問題

未來國研院國震中心臺南實驗室將與功能互補的臺北實驗室南北呼應，因應臺灣環境特性發展尖端耐震技術，促使我國成為國際地震工程的研究重鎮；並結合南部地區大專院校的地震工程研發能量，成為當地研究人才重要培育搖籃。後續臺南實驗室將逐步建置離岸風機關鍵組件測試平台，鏈結沙崙綠能科學城與聯合研究中心，為我國綠能產業發展共盡心力。此外，南部既有之石化廠、煉鋼廠及高科技公司，許多工業管線、儲油槽及廠房設備均存在設備耐震問題。臺南實驗室啓用後，除可就近協助南部產業界進行耐震能力測試外，亦可激發業界解決耐震問題之意願及興趣，進而投入研發人力，透過產學交流，共同為我國防災科技與產業貢獻心力。

研究員 吳俊霖、副工程師 楊鶴雄

MTS 全球地震工程使用者會議

本中心自民國 87 年啟用北部研究大樓與結構實驗室以來，以其先進之結構試驗設備，為國內乃至全球地震工程領域之進步發展，提供了卓著貢獻。本中心所使用之重要試驗設備，包括地震模擬震動台、反力牆與強力地板結構實驗設施、減震消能元件測試系統、多軸向試驗系統等，多採用美國 MTS 公司所生產之油壓設備、控制系統與控制軟體。本中心之所以採用該公司製品，除其品質良好外，該公司能在眾多標案中得標，主要是由於 MTS 公司可與本中心配合，依中心需求高度客製化其產品，或對結構實驗技術與中心進行協同開發。雙方曾合作開發之計畫項目計有：雙向房屋結構擬動態試驗控制程式、單自由度即時擬動態試驗技術，以及共同設計規劃多軸向及雙軸向試驗系統等。

本中心台南實驗室已於今年(2017)八月九日開幕，期能為台灣乃至全球結構實驗與地震工程研究領域提出新的貢獻。早於 2016 年中，本中心人員前往美國 MTS 總公司針對台南實驗室購案進行場驗時，MTS 即提出利用本中心台南實驗室開幕之際，舉辦一 MTS 於結構實驗領域全球第一次使用者集會之構想。主要原因在於本中心台南實驗室開幕之際，將有為數眾多之結構實驗領域相關之國際專家學者來台參與開幕與討論，而這當中本來就有不少 MTS 產品之使用者。藉此機會舉辦此一 MTS 結構實驗領域使用者之專屬會議，可以讓各研究機構有機會交流使用 MTS 設備之經驗，以及分享各自最新發展之實驗技術與成果。

本次會議於八月七日開始，共計有來自 13 個國家(台灣、美國、印度、紐西蘭、韓國、中國、義大利、科威特、日本、俄國、智利、澳大利亞、捷克)，共 71 位專家學者參與，於台南香格里拉飯店舉行為期兩天之使用者會議。在 MTS 總裁 Steve Harrison 與中心黃世建主任開場後，會中發表了多篇演講，內容涵蓋各實驗室在結構實驗技術上之最新發展與實際應用案例。

MTS 的應用工程師 Tim Zappia 以 Summary of MTS seismic testing work 為講題，簡述 MTS 地震工程領域相關產品歷史。本中心王孔君博士以 Hybrid testing with model updating on steel panel damper substructures using a multi-axial testing system 為講題，發表本中心最新發展之利用多軸向試驗系統進行之多自由度混合模擬試驗與線上模型更新技術。EUCENTRE 的 Alberto Pavese 博士以 Testing techniques of anti-seismic devices and specifically on dynamic and hybrid simulation using bearing tester systems 為題介紹位於 EUCENTRE 之雙軸向試驗系統(BTS)，以及利用 BTS 與反立牆與強力地板試驗設施協同進行之即時混合模擬試驗。MTS 資深工程師 Brad Thoen 以 Seismic System Control 為題，發表了 MTS 最新研發之應用於震動台且不須重複調控制參數之 Specimen Dynamics Compensation 控制技術。其並於另一演講中，介紹以 Simulink 配合震動台控制程式進行系統模擬之方式。Karunya University 的 G. Hemalatha 教授以 Testing of magnetoreheological dampers for seismic applications 為題，介紹利用 MTS 設備進行磁流阻尼器於抗震應用之研究。MTS Korea 的 H.L.Ko 以 Pre-engineered MTS Seismic Solutions 為題，介紹若干 MTS 所生產之

具有不同尺寸與測試容量，非客製化而具有標準規格以能快速安裝與使用之震動台系統。UC Berkeley 的 Steve Mahin 教授以 Recent advances in application of hybrid simulation to real-time and near real-time testing 為題，介紹了近年利用 OpenSEES 與 OpenFresco，以 UC San Diego 之 Seismic Response Modification Device (SRMD) 進行之即時混合模擬實驗。Mahin 教授亦介紹了使用 OpenSEES 與 OpenFresco，以 UC Berkeley 之震動台進行之混合模擬試驗。MTS 的 Shawn You 博士以 Recent developments in hybrid simulation 為題，介紹 MTS 與 UC Berkeley 合作開發之混合模擬試驗軟體，以及若干 MTS 客戶應用該試驗軟體所進行之研究成果。日本清水建設 Hitoshi Kumagai 博士以 Seismic testing using the newly completed shaking table and a consideration of 2016 Kumamoto earthquakes 為題，介紹了清水建設新完成之震動台(E-Beetle)與若干觀於去年熊本地震之特性。演講內容亦包括以 E-Beetle 重現熊本地震(Kumamoto earthquake)之效能。MTS 的 Jim Hennen 分別以 Test Laboratory Efficiency 與 Failure prognosis in hydraulic test systems 為題，介紹 MTS 新近開發之相關軟硬體，可對實驗設施進行遠端監控、長期系統健康監測、系統背景感應器資料記錄、系統健康狀態評估、使用能源監測與調度、減少漏油、提高位移量測準確度，與增進實驗管理效率。MTS 的應用工程師 Tim Zappia 以 University of Nevada – Reno lab overview and some of the different testing methodologies used 為題，介紹 University of Nevada – Reno 之結構實驗室與若干先進實驗成果與技術。

在上述演講結束之後，大會亦將所有參與人員分成五組進行討論，討論內容為未來可能研究方向，以及 MTS 在未來相關研究中，就設備提供者之立場，可能提供的在技術與設備上的支援。

本次會議邀請全球 MTS 地震工程領域使用者共聚一堂，彼此交流分享結構實驗經驗與技術發展之成就，同時也讓 MTS 公司更直接了解使用者之需求，有助於未來更先進技術與試驗設備之開發，成果可謂頗為豐碩。



圖一 本次會議與會人員

技術師 王孔君

結構抗震與健康監測新技術研討會

一、前言

近年來國際上幾次重大的地震，諸如日本東北大地震、四川地震等，再次喚醒 1999 年九二一集集大地震的記憶，也提高國內產官學研界對於土木結構抗震與健康監測新技術之重視。國家地震工程研究中心於 1998 年正式營運以來，除了持續精進學術研究與創新技術外，同時扮演產官學研界間的橋梁。此外，所具備豐富且完整之實驗設施，包含了振動台、多軸向試驗系統、減震消能測試系統與反力牆等，提供了諸多先進抗震技術研發及隔減震產品之實體與性能保證試驗服務。然而，隨著地震工程領域之理論與技術提昇，日本、美國等於地震工程領域具領導地位之國家，莫不積極提昇相關試驗設備或擴充實驗室之容量。有鑑於此，國家地震工程研究中心於 2002 年即開始長期規劃，積極爭取第二實驗室之建置，待取得政府預算且確定落腳成功大學歸仁校區後，便於 2015 年舉行動土典禮，土木工程與試驗設備於 2017 年完工，其後正式命名為國家實驗研究院國家地震工程研究中心臺南實驗室。為了將臺南實驗室之啟用資訊，以及近年來國內外於結構抗震與健康監測之新技術研發與應用成果，分享給國內產官學研界的先進，於 2017 年 8 月 11 日，假臺南實驗室，與地震工程學會及結構工程學會共同舉辦「結構抗震與健康監測新技術研討會」，並邀請國內外學研界及業界的專家進行分享(圖一)。

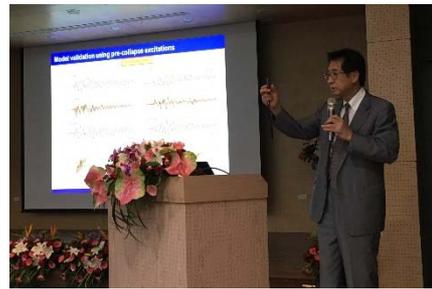


圖一 研討會來賓合照

二、演講內容

本次研討會，特別邀請全球知名的日本東京工業大學笠井和彥(Kazuhiko Kasai)教授進行專題演講(圖二)，其演說內容主要分享目前全球最大型振動台 E-defense 所進行的相關試驗研究，呼應了臺南實驗室所新建的長衝程振動台，同時也點出了未來可能的合作研究方向。台灣大學羅俊雄教授分享了關於結構健康監測的研究成果，以子空間識別法，即時識別結構勁度之變化，並對結構進行診斷。中興大學林其璋教授與成功大學朱世禹教授，則針對調諧質量阻尼器分享其研究與應用成果。暨南大學施明祥教授則針對液流阻尼器之發展與應用，提出了未來可能的研究趨勢與落實應用的可能性。地震中心林旺春博士，以國內隔減震試驗技術為主題，分享現階段針對隔減震試驗的規範規定與試驗能量。地震中心楊卓諺博士，介紹臺南實驗室先進的試驗設施與能量。中興工程陳逸軒博士與潤弘精密梁嘉洲技師，各分享了不同隔震建築實務設計案例。築遠工程張盈智技師，分享了黏彈性阻尼器與結構健康監測系統應用於住宅大樓的實務案例。大彥工程楊培

堅技師，針對實務設計中位移型與速度型阻尼器的應用時機，以及兩者的組合應用，做了清楚的說明。



圖二 Kasai 教授專題演講

三、臺南實驗室試驗設施簡介

臺南實驗室主要之試驗設備有，8 m 見方之長衝程高速度地震模擬振動台、雙軸向動態試驗系統及反力牆等。該大型振動台，其最大承載重量為 2500 kN，水平兩向之最大位移為正負 1 m；於空台之狀況下，最大加速度於水平向與垂直向分別為 2.5 g 與 3 g；水平向最大速度為 2 m/sec，故可重現具有長週期與速度脈衝特性之近斷層地震歷時。該雙軸向動態試驗系統，其長向最大出力為 ±4MN，最大位移為 ±1.2 m，最大速度為 1 m/sec，最大垂直載重為 60 MN，未來可針對隔震器等新式抗震元件進行動態試驗(圖三)。綜觀上述臺南實驗室兩主要的試驗設備，不難發現其目的主要針對近斷層地震與相關因應對策之研究議題所建立，呼應目前全球地震工程主要之研究趨勢，同時可提昇國內之試驗能量，持續與美、日等國在地震工程領域並駕齊驅。



(a) 雙軸向動態試驗系統

(b) 長衝程高速度振動台

圖三 臺南實驗室試驗設施

助理研究員 楊卓諺、林旺春
國立台灣大學博士候選人 游忠翰
研究員 汪向榮