

發行人：黃世建

本期主編：林旺春、游忠翰

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.ncree.org.tw>

108 年 6 月出版

81 年 3 月創刊・季刊

目錄

●專題報導：

結構與非結構技術發展

鉛心橡膠隔震支承墊多軸向遲滯行為之試驗與分析研究 1

雙軸向動態試驗系統基本參數之研究與探討 3

花蓮慈濟醫院隔震結構於強震作用下之反應探討 4

利用混合滑動模式控制設備物隔震系統 5

儲槽近斷層效應試驗研究-試驗規劃與結果 6

醫院消防撒水系統耐震性能評估方法與補強 7

功能性設施耐震性能測試驗證機制 8

●中心活動

離岸風機振動台模型試驗與先進土壤動力試驗室參訪 9

人工智慧研究中心產學交流論壇 9

●國際交流

現地型地震預警系統印度示範站建置 10

●研討會

2019 國家地震工程研究中心實驗成果研討會(I) 10

2019 基礎設計與施工問題研討會 11

2019 高層建築發展及補強研討會 11

國家地震工程研究中心

簡訊

2019.6 第一一〇期

專題報導

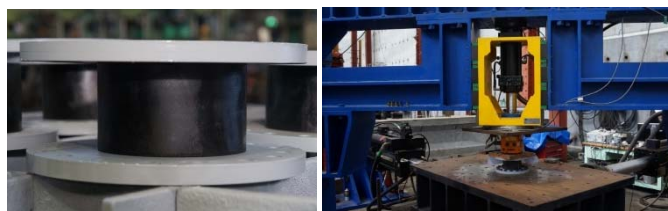
《結構與非結構技術發展之一》

鉛心橡膠隔震支承墊 多軸向遲滯行為之試驗與分析研究

在過去數十年間，積層橡膠支承墊，包含鉛心橡膠支承墊(Lead Rubber Bearing, LRB)、天然橡膠支承墊(Natural Rubber Bearing, NRB)與高阻尼橡膠支承墊(High-Damping Rubber Bearing, HDRB)已經透過大量的振動台試驗與實務應用，證明於地震下可獲得相當滿意的耐震性能表現。在這各式各樣的積層橡膠支承墊中，則以鉛心橡膠支承墊較為普遍採用於隔震設計中，並廣泛應用於全球建築工程、基礎建設與設施。一般而言，鉛心橡膠支承墊之遲滯模型可透過在承受固定垂直軸力與水平單軸載重下的試驗結果求得，並用於表達其於動態平面軌跡下之力學特性。然而，過去研究成果顯示，鉛心橡膠支承墊在承受水平單軸與雙軸向非比例平面載重下之試驗結果並不相同，如果一來，可能造成設計結果不甚準確，亦或未盡保守。因此，本研究將採用縮尺高阻尼橡膠隔震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，藉由不同型式反覆載重加載下遲滯行為之探討，以提出一修訂數學分析模型，進而可提升其應用於模擬高阻尼橡膠隔震支承墊遲滯行為之準確性與設計時之保守性。

一、試體介紹與試驗程序

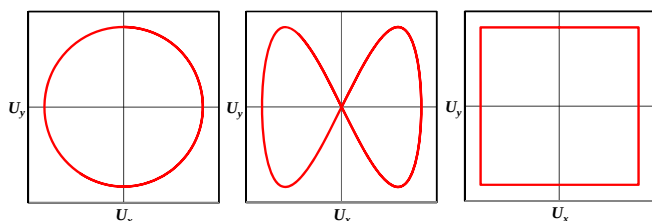
本研究規劃於三軸向縮尺試驗設施，進行縮尺鉛心橡膠支承墊於單軸向反覆加載試驗與雙軸向平面非比例軌跡運動試驗，採用之試體具有一直徑 30mm 之鉛心，其由 16 層厚度為 2mm 之橡膠層及 15 片厚度為 2mm 之鋼板組合而成。試體直徑與高度分別為 128mm 與 62mm，試體配置與試驗設施如圖一所示。透過圖一可知，



圖一 縮尺高阻尼橡膠支承墊與三軸向縮尺試驗設施

試體鎖固於垂直向動態油壓致動器與水平雙向滑動平台間，藉由垂直向動態油壓致動器對試體施加載重垂直荷載，與雙向滑動平臺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，以加載水平位移。安裝線性滑軌系統於雙向滑動平台內，以降低三軸向動態縮尺試驗設施引致之摩擦力。同時，透過額外安裝荷重計於制動器端部，以量測試體之實際受力反應。在垂直向軸壓應力分別為 50 kg/cm² 與 100 kg/cm² 條件下，分別進行以三角波與正弦波之單軸向反覆加載試驗，以及考慮不同試驗振幅與測試頻率條件下，執行圓形、八字形與正方形之雙軸向平面非比例軌跡運動試驗，如圖二所示。其中，假設平面運動軌跡路徑於相互正交之水平軸隨時間 t 變化

之位移分量分別為 U_x 與 U_y ，以及相互正交之水平軸向位移振幅為 U_0 ，並可獲得圓形、八字形與正方形之平面軌跡路徑之最大位移向量分別為 U_0 、 $((U_x^2 + U_y^2)^{1/2})_{\max}$ 與 $2^{1/2}U_0$ 。

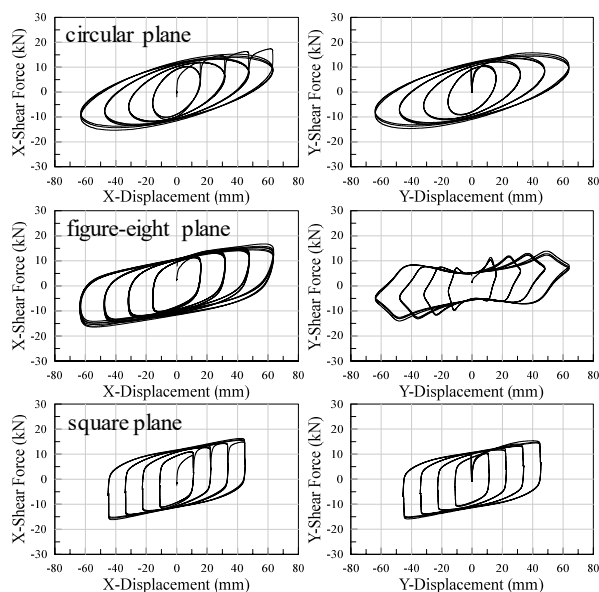


圖二 平面非比例運動軌跡圖

二、試驗結果與數值分析探討

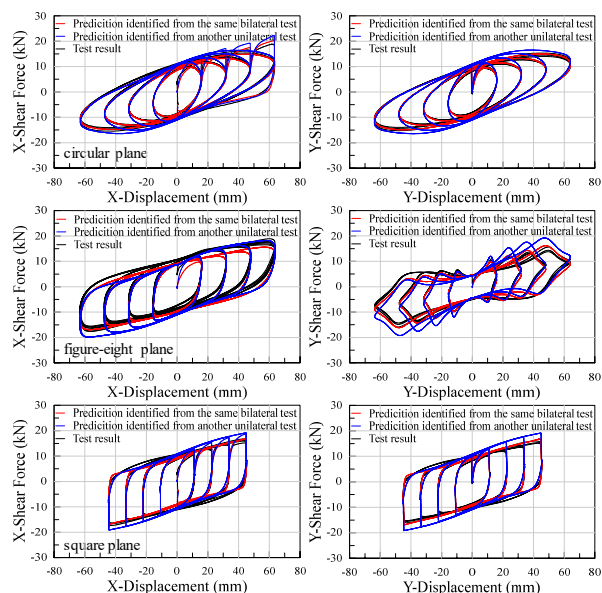
支承墊承受軸壓應力為 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，分別進行速度為 $16\text{mm}/\text{s}$ 之三角波反覆載重與頻率為 0.0125Hz 正弦波反覆載重試驗的遲滯迴圈，由試驗結果顯示支承墊在承受水平單軸向載重下，皆具有良好且穩定的消能能力，並無發生循環軟化(cyclic softening)的現象。值得注意的是，透過觀察可知有別於正弦波反覆載重試驗，進行三角波反覆載重試驗時，遲滯迴圈於加載到卸載的階段會產生稍微尖銳的現象。再者，根據支承墊於承受水平單軸向載重下之遲滯迴圈明顯可知，其遲滯迴圈可採用理想化雙線性遲滯迴圈分析模型進行模擬。

圖三為支承墊承受軸壓應力為 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，進行頻率為 0.0125Hz 之平面軌跡載重試驗遲滯迴圈比較，依據試驗結果可知，圓形平面軌跡載重試驗在 X 與 Y 方向的遲滯迴圈與黏彈性模型的力學行為十分相似。透過觀察八字形平面軌跡載重試驗遲滯迴圈結果，發現八字形平面軌跡載重試驗在 X 方向之遲滯迴圈近似於水平單軸向載重下之遲滯迴圈，惟與典型的力學行為相比，則其遲滯迴圈具有較為平滑之形狀；以及在 Y 方向的遲滯迴圈形狀類似於一迴旋鏢。最後由正方形平面軌跡載重試驗遲滯迴圈結果，發現在 X 與 Y 方向的遲滯迴圈近似於水平單軸向載重下之典型雙線性遲滯迴圈。



圖三 雙軸向平面非比例軌跡運動之遲滯迴圈試驗結果

本研究原提出一具 10 個待定係數之數學分析模型，因若採用單軸向三角波反覆加載時，其速度歷時為階躍函數(step function)，較無法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及參數之合理性，本研究提出一具 9 個待定係數之數學分析模型。根據平面向量之觀念，亦提出一修訂數學分析模型，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，透過相同試驗之識別參數進行預測，依分析結果顯示本研究提出具 9 個待定係數之數學分析模型可準確模擬其於不同平面軌跡反覆加載條件下之遲滯行為。



圖四 試驗結果與數值分析之遲滯迴圈比較圖

進一步為證明其模型之適用性與準確性，採用支承墊承受軸壓應力為 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，進行速度為 $16\text{mm}/\text{s}$ 之三角波反覆載重之識別參數進行預測，其於不同平面軌跡反覆加載條件下之遲滯行為，由結果顯示本研究提出具 9 個待定係數之數學分析模型針對水平雙軸向平面軌跡反覆加載的遲滯行為具有顯著的預測結果進而可證明其模型的準確性與適用性。

三、結論

本研究執行鉛心橡膠支承墊於水平單軸與雙軸向非比例平面軌跡加載試驗，以完整探討其在不同載重加載下之遲滯行為，並提出具 9 個待定係數之數學分析模型模擬其在非比例平面軌跡加載下之力學行為。透過水平單軸與雙軸向非比例平面軌跡加載試驗的比較，足以看出支承墊之遲滯行為對於平面加載路徑與加載速度的相依性。根據水平單軸與雙軸向非比例平面軌跡加載試驗的識別參數分別進行模擬，由結果顯示建議之分析模型針對水平雙軸向平面軌跡反覆加載的遲滯行為具有顯著的預測結果，進而可證明其模型的準確性與適用性。

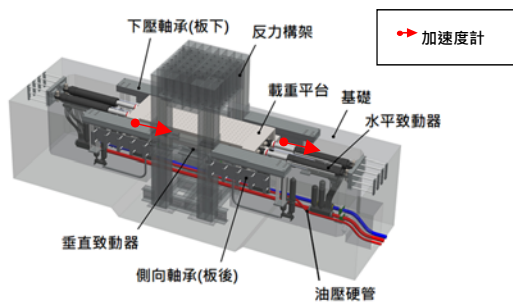
副研究員 林旺春

國立台灣科技大學副教授/組長 汪向榮

國立台灣科技大學教授/兼任研究員 黃震興

雙軸向動態試驗系統基本參數之研究與探討

國家地震工程研究中心於 2017 年啟用台南實驗室，並建置一雙軸向動態試驗系統(Bi-Axial dynamic Testing System, BATS)，主要用於進行實尺寸隔震支承之動態性能測試。BATS 由反力構架、載重平台、油壓致動器與基礎組成，其配置示意圖如圖一所示。在對外提供研究與測試服務之前，必須對 BATS 之動態特性與基本參數，如等效質量與系統平均摩擦係數有更為清楚之瞭解與掌握。故規劃與執行一系列不同水平速度與位移振幅的三角波循環載重試驗與不同振動頻率與位移振幅的正弦波循環載重試驗，並透過試驗結果的分析與驗證的比較，探討所獲得基本參數之適用性與其穩定性。



圖一 雙軸向動態試驗系統與試驗配置

一、研究方法

主要研究內容分為三階段：(1)第一階段為在未加裝隔震支承下，針對試驗系統分別進行一系列的三角波與正弦波之循環載重試驗，其目的為求得試驗系統之載重平台於垂直向空載下對應不同水平速度之系統平均摩擦係數與其平均等效質量；(2)第二階段為針對試驗系統進行隔震支承試驗條件，在載重平台安裝平面滑動摩擦隔震支承後，於施加垂直軸向荷載，分別進行三角波與正弦波之循環載重試驗，進而依簡單線性迴歸分析求得試驗系統載重平台於垂直向荷載分別為 10 MN 與 30 MN 下，對應不同水平速度之系統平均摩擦係數。(3)執行足尺寸滑動摩擦隔震支承之試驗，根據試驗數據與理論值之分析探討，以證明本研究所得之 BATS 等效質量與系統摩擦係數，具有一定之合理性與適用性。

二、試驗結果與分析

依垂直空載試驗結果所得之平均摩擦係數($\mu_{0,avg}$)方程式如下所示，進而求得平均等效質量($m_{eff,avg}$)為 96.69 ton。

$$\mu_{0,avg} = 3 \times 10^{-6} |\dot{x}(t)| + 0.0008 \quad (1)$$

其中， $\dot{x}(t)$ 為載重平台之速度。

採用平面摩擦支承進行垂直荷載 10 MN 與 30 MN 之循環載重試驗，依簡單線性迴歸分析求得試驗系統之系統平均摩擦係數(μ_{avg})方程式分別如下所示：

$$\mu_{avg} = 3 \times 10^{-6} |\dot{x}| + 0.0003 \quad (2)$$

$$\mu_{avg} = 3 \times 10^{-7} |\dot{x}| + 0.0002 \quad (3)$$

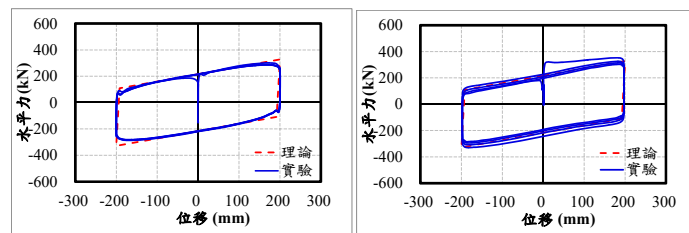
當垂直荷載介於 0 至 10 MN，其對應之平均摩擦係數可以式(1)與(2)內差求得；同理，當垂直荷載介於 10 至 30 MN 時則以式(2)與(3)內差求得。

三、足尺寸隔震支承試驗之應用與驗證

為驗證所得系統之平均等效質量與平均摩擦係數之適用性與合理性，採足尺寸雙曲率摩擦單擺支承進行試驗，其中摩擦材直徑為 400 mm，曲率半徑為 4500 mm，試驗項目列於表一。依識別基本參數與理論遲滯迴圈之比較，透過圖二可發現於兩種試驗速度下，試驗所得之力與位移之關係，可獲得與理論值相當一致之力學特性。

表一 足尺寸滑動摩擦支承試驗項目

試驗	振幅 (mm)	速度 (mm/s)	垂直荷載 (kN)	循環數
1	200	20	5027	4
2	200	400	5027	



(a) 試驗 1

(b) 試驗 2

圖二 遲滯圈比較

四、結語

本研究透過一系列不同水平速度與位移振幅的三角波循環載重試驗與不同振動頻率與位移振幅的正弦波循環載重試驗，於 BATS 執行垂直空載與荷載 10 MN 與 30 MN 之試驗，經分析與回歸得其平均等效質量，以及於垂直不同荷載下不同水平速度激振時對應之平均摩擦係數方程式。最後透過足尺寸摩擦單擺支承動態試驗之驗證，可知試驗結果與理論值相當一致，以證明本研究所得之 BATS 基本參數，具有一定之合理性與適用性。

副研究員 林旺春、專案助理研究員 劉瓊琳

助理研究員 楊卓諺、游忠翰

國立台灣科技大學副教授/組長 汪向榮

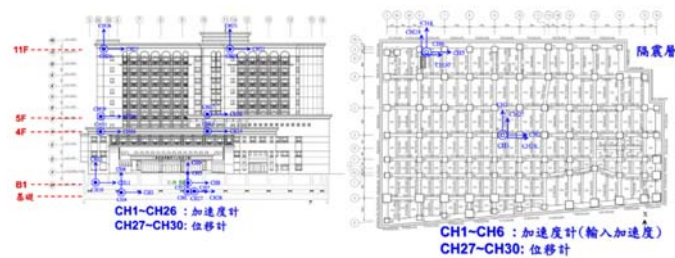
國立台灣科技大學教授/兼任研究員 黃震興

花蓮慈濟醫院隔震結構於強震作用下之反應探討

近斷層地震的速度歷時中，可以觀察出瞬間且高速的脈衝波，同時於該歷時的加速度反應譜上，亦可發現於中長週期範圍內，有明顯高於一般地震及規範設計反應譜之現象。此一現象對於結構自然振動週期較高之建築，如高樓結構、以及隔震結構等，皆會造成額外的負擔。本研究透過實際受振反應之比較與數值模型之動力歷時分析，探討隔震結構於近斷層地震作用下，所面臨的難題與挑戰。

一、花蓮慈濟醫院隔震結構

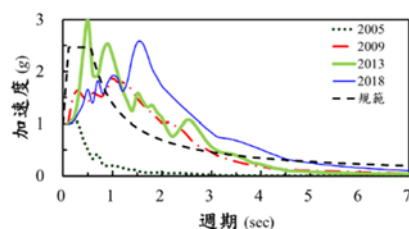
合心樓位於花蓮慈濟醫學中心院區，主要用途為急診、外科手術以及一般和加護病房。結構為地上十一層、地下一層之鋼骨鋼筋混凝土建築，採用基礎隔震設計，隔震系統位於地下一層下方，安裝有直徑不等之鉛心橡膠支承及平面滑動支承。該結構自 2005 年 2 月竣工起，便於特定樓層之中央及角隅位置安裝有加速度規，分別量測水平雙向的加速度反應，並且於隔震層相對應加速度規之位置，安裝有位移計，量測隔震系統之變位(圖一)。



圖一 合心樓強震儀配置圖

二、結構加速度反應監測紀錄

採用四次自建築完工以來，於花蓮市區造成震度五級以上之地震，觀察結構於地震下之真實反應。四次地震發生時間依序為：2005 年 4 月 30、2009 年 12 月 19 日、2013 年 10 月 13 日以及 2018 年 2 月 6 日，而規模分別為 5.6、6.9、6.4 及 6.0，除 2018 年地震於花蓮市區造成 7 級震度外，其於三次地震則造成 5 級震度。若以基礎樓版作為該結構的輸入地震，將此四次地震下基礎樓版中央處長向之加速度紀錄，整理成正規劃至有效尖峰加速度為 1 g 之加速度反應譜，並與現行規範同樣正規劃至有效尖峰加速度為 1 g 之設計反應譜相比(圖二)，可以發現除 2005 年之地震外，其他三筆地震皆於中長週期範圍處，超過規範反應譜值。



圖二 地震歷時正規化反應譜比較圖

將各地震下加速度規所量測到的最大值，及其與輸入加速度最大值之比值整理如表一。比較表中 2005 與 2009 的結果，發現

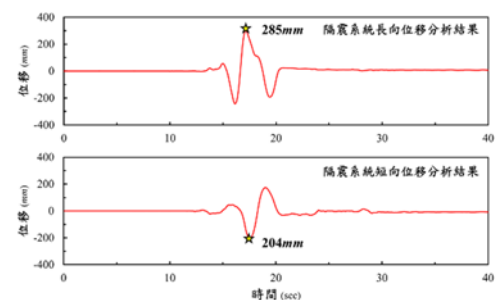
雖然此兩筆地震之輸入加速度最大值相似，但因為 2009 地震於中長週期有較高反應譜值之關係，導致隔震效率較差。另一方面，比較 2009、2013 及 2018 等三筆地震，就十一樓樓版與基礎樓版之比值而言，隔震效果會隨著地震程度的增加而上升。

表一 地震加速度最大值比較結果

樓層	2018	2013	2009	2005
11F	209	92	102	79
5F	182	54	64	56
4F	178	50	62	49
B1F	181	52	71	38
基礎	266	80	104	103
11F / 基礎	79%	115%	98%	76%
5F / 基礎	68%	68%	62%	54%
4F / 基礎	67%	63%	60%	48%
B1F / 基礎	68%	66%	69%	37%

三、隔震系統位移反應

依照 2009 年地震加速度量測資料，參考 SRIM 結構系統識別之結果，建立適當考慮部分外掛牆與隔間牆勁度之數值模型，並且以其他三筆地震歷進行驗證，確認模型中隔震系統與上部結構高模態行為之正確性。由數值分析模型推估 2018 年地震下，隔震系統之位移反應，結果如圖三所示。由圖中可以得知，隔震系統長向位移的最大值約為 285 mm。反觀隔震結構長向之設計值，該設計採用民國 86 年出版之耐震設計規範，工址震區係數 Z 為 0.33 g，設計隔震位移為 240 mm 隔震總位移為 290 mm；相較之下，於 2018 年地震下結構長向輸入加速度最大值僅為 0.27 g，卻在該方向上造成 285 mm 的隔震位移。由此顯示近斷層地震的確會對於隔震系統造成額外的負擔，此種現象在設計階段時不可不慎。



圖三 2018 地震下隔震系統位移反應分析結果

四、結語

依據隔震結構於近斷層地震下的實際量測紀錄與相關模擬分析可以發現，雖然隔震系統可以有效降低上部結構加速度反應，然卻會有額外的位移負擔。因此，於結構設計階段進行動力歷時分析時，若該結構位於近斷層地震影響區域，則必須特別以近斷層地震歷時驗證設計，方能有保守且安全的隔震設計。

助理研究員 游忠翰
組長 汪向榮

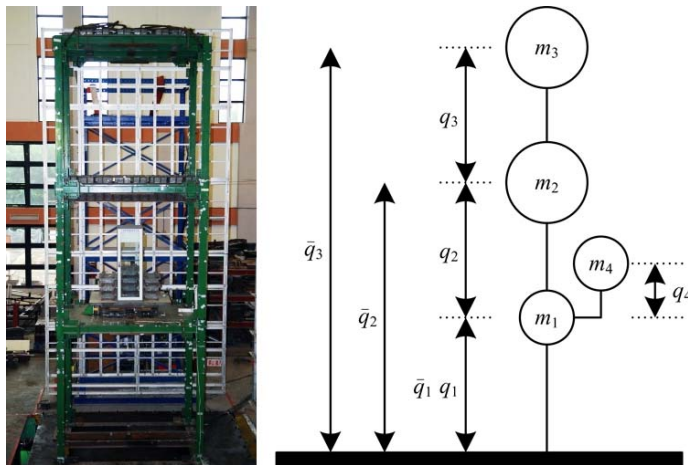
利用混合滑動模式控制設備物隔震系統

重要設備物與非結構物非常容易受到振動損害，更重要的是，這些重要設備物與非結構物的損傷可能會造成重大的經濟損失或是導致人原傷亡。本研究的目標為發展一套不但可以控制設備物並且可以控制結構的混合控制系統，該系統將透過混合控制增益（Control Gain）克服傳統線性二次型調節器（Linear Quadratic Regulator）與滑動模式控制（Sliding Mode Control）的缺點，其中線性二次型調節器為最佳化控制理論中重要的結果，而滑動模式控制則為出名的非線性控制器，兩者均為近代普遍被各界採用的控制方法。

一、目標結構物

本目標結構物為 Fan *et al.* 於 2009 年測試的實尺寸之三層樓鋼結構，此結構如圖一所示，重要設備物安置於二樓，並且利用隔震系統與二樓樓板相接，為了簡化問題，該隔震系統僅保有單一頻率，而一個油壓制動器則用來連接至隔震系統的上下邊，以實現控制力，減低隔震系統的反應。此次採用之數值模型將目標結構物簡化為單向的質點系（Lumped Mass Systems）遭受地震振動，模擬所採用的地震為 El Centro 地震（1940 年 5 月 18 日）。為了比較不同控制方法的控制效果，本研究採用 Ohtori *et al.* 於 2004 年所提出的控制指標，此指標不僅考慮層間側位比（inter-story drift ratio），亦考慮絕對加速度反應。

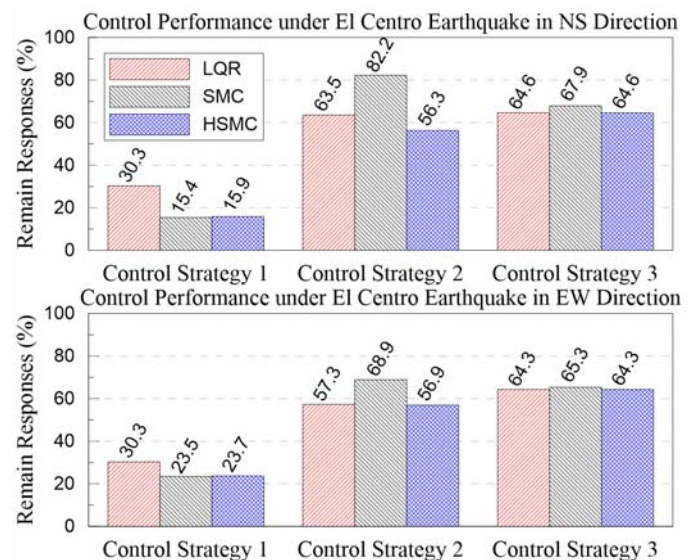
而為了展示不同控制方法的控制特性，並研發一套不但可以控制設備物並且可以控制結構的混合控制系統，本研究採用三種不同的控制情境：(1) 僅考量設備物的絕對加速度反應、(2) 僅考量結構物的層間側位比與(3) 同時考量絕對加速度反應與層間側位比。其中控制情境(1)預計能優先考量設備物反應，並將設備物的加速度降到最低，控制情境(2)應能優先考量結構物反應，並將結構物的層間側位比有效壓制，而控制情境(3)則試圖不僅同時減少設備物與結構物的反應，並且同時考量加速度與層間位移的平衡。



圖一 目標結構物照片與數值模型

二、控制效果

圖二顯示了不同控制方法與不同控制情境下的控制效果，其中百分比為在隔震系統與油壓制動器雙雙發揮作用下的反應比上純粹僅有安裝隔震系統的反應。首先，百分比均小於 100 代表無論在何種控制方法與情境之下，安裝油壓制動器均可以大幅減低地震造成的反應。其次，我們可以觀察得到線性二次型調節器與滑動模式控制在處理控制情境(1)與控制情境(2)時展現了不同的控制成果，雖然控制效果相當，但差異的程度仍暗示兩種控制方法的控制力截然不同。



圖二 不同控制方法與情境下的控制效果

圖二亦顯示在線性二次型調節器與滑動模式控制兩種控制方法之中，滑動模式控制善於減低設備物的加速度反應，而線性二次型調節器則對於結構物的層間側位比更加有效。令人驚豔的是混合滑動模式控制的結果，無論在控制情境(1)或是控制情境(2)，該方法均展現了最佳的控制成果，即便是控制情境(3)，同時考量多種反應的狀態下，該方法仍能達到非常不錯的控制效果。

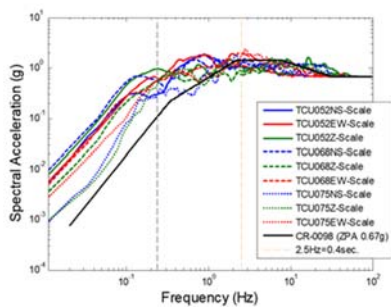
三、結語

此研究初步顯示混合滑動模式控制相較於傳統的控制方法（無論是線性二次型調節器或是滑動模式控制）均有優勢，在控制成果中，我們可以觀察到一種取捨（Trade-off）的現象：若要控制好設備物的加速度反應就必須要犧牲結構物的層間側位比，反之亦然。雖然如此的兩難限制了傳統控制方法的發揮，但是混合滑動模式控制克服傳統線性二次型調節器與滑動模式控制的缺點，有鑒於此，未來將透過實尺寸的振動台試驗來驗證本控制方法的可行性與優點。

助理研究員 黃謝恭
台灣大學教授 羅俊雄

儲槽近斷層效應試驗研究-試驗規劃與結果

發電廠、重工業常用之大型液體儲槽內容物，其振盪模態頻率偏低，可能與近斷層地震動發生共振，導致內容物損傷儲槽、內容物潑濺而出導致使用機能喪失，如工業儲槽於強震下潑濺高度過大而撞擊損傷頂部蓋板。此外，核電廠用過燃料池於耐震設計時假設的失效模式之一，即包括池水因震盪而潑濺出池外，導致用過燃料棒冷卻失效。根據 Baker 的研究(Jack W. Baker, 2007)，一般近斷層地震動之速度脈衝週期在 0.4 到 12.9 秒之間 (0.078~2.5 Hz)，依據台灣某電廠多座戶外 RC 儲水槽規格，其對流模態之頻率落在 0.22~0.31 Hz 間，即對流模態可能與近斷層地震產生共振。此外，近斷層地震可能於低頻區段高於設計地震之要求。圖一為在相同的零週期加速度(0.67g)的條件下，5%阻尼比之九二一集集地震反應譜與 NUREG/CR-0098(Newmark N. M. & Hall W. J., 1978)設計反應譜比較，可見在儲水槽 0.22~0.31 Hz 之間，實際近斷層地震動高於設計譜加速度。



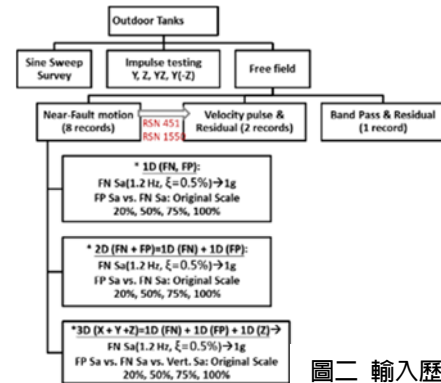
圖一 地震動反應譜比較

據此，國家地震工程研究中心於 107 年規劃並完成縮尺儲槽近斷層地震動振動台實驗，檢核近斷層地震動下，各規範於不同液體深度(H/R)下之對流與衝擊模態、潑濺高度、潑出水量之評估方法準確性與保守性，輸入超過 200 組近斷層歷時，據以觀察槽體與內部液體受震行為之近斷層效應，同時比對 Housner(Haroun M. A. & Housner G. W., 1981)模態頻率與潑濺高度評估公式之適用性及差異性。

一、試驗規劃

為研究儲槽內液體之基本動力特性和耐震行為，本實驗設計不同目的輸入歷時，包括系統識別測試之正弦掃頻(sine-sweep)和脈衝(impulse)測試波，如圖二所示。從 PEER NGA West 數據庫挑選出 5 個地震事件中的 8 筆紀錄進行近斷層地震動測試，挑選依據為比對每筆地震動垂直斷層分量(fault-normal, FN)之速度脈衝週期(T_p)以及譜速度峰值週期(T_{sv})與 30 公分和 60 公分水深預測之對流模態頻率(1.2Hz)。此外，為瞭解在共振或非共振頻率下速度脈衝對潑濺高度的影響，以 Baker 提供之 MATLAB 程式從 RSN451 和 RSN1550 中萃取出速度脈衝和殘餘地震動。藉由比較原始近斷層地震動、速度脈衝和殘餘地震動之潑濺高度測試結果，可瞭解長週期脈衝對於潑濺行為的貢獻。實驗中，因振動台尺寸以及儲槽最小水深的限制，設計一縮尺儲槽試體，其對流模態頻率略高於戶外 RC 儲槽之對流模態頻率，頻率維持 1.25Hz 以下。為研究不同水深(H)之潑濺行為，本實驗設計了兩組內徑(2R)為

0.6m 之圓形儲槽試體，分別用於 H/R=1 和 H/R=2 的條件，每組試體包含一個高儲槽和一個低儲槽，對於同一組試體之儲槽，具有相同水位，且同時受到相同之輸入歷時。透過設計同一組試體的兩個儲槽高度，僅使低儲槽內的水可潑濺出。對於同一水深和輸入歷時，可以從高儲槽中量測水之潑濺高度，從低儲槽中量測水之潑濺流失量，藉此得到潑濺高度和流失量之關係。

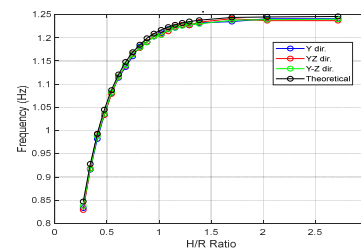


圖二 輸入歷時之分類

二、結果與討論

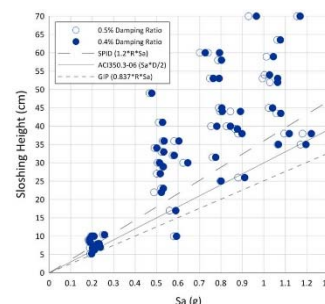
圖三為實驗所得對流模態頻率與 H/R 之關係，結果顯示實驗對流模態頻率略高於理論值，而垂直向輸入之影響並不顯著。

為驗證 GIP-3A 中定義直立式儲槽之 0.5%對流反應阻尼比，以對數衰減法(logarithmic decrement)計算實驗所得脈衝測試結果，結果顯示對流反應阻尼比與輸入地震方向無相關性，水深越深其值越小，最終趨近於 0.4%。



圖三 對流頻率與 H/R 之關係 (Chai et al., 2019)

圖四為輸入地震力所得之譜加速度與潑濺高度之關係，X 軸為實驗中兩種水位(30cm & 60cm)對流模態頻率所對應之譜加速度，包含兩種阻尼比(0.5% & 0.4%)之譜加速度，結果顯示 0.4% 阻尼比之結果較接近理論計算結果，但整體潑濺高度仍遠高於理論值，因此，在強震下潑濺行為的非線性必須於理論計算中加以考慮。

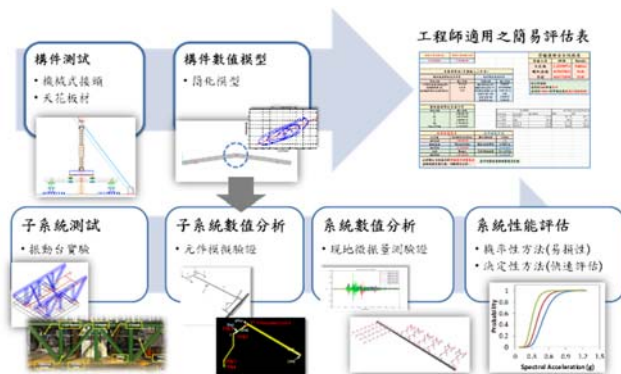


圖四 譜加速度與潑濺高度之關係 (Chai et al., 2019)

專案助理研究員 徐瑋鴻
副研究員 林凡茹、研究員 柴駿甫

醫院消防撒水系統耐震性能評估方法與補強

醫院非結構設備中之消防撒水系統於中小型地震中，若於某處發生漏水，或天花板經撒水頭碰撞發生粉塵掉落、擴孔等災情，甚至於大震中撒水系統支撐處失去抗震能力，可能造成醫院中斷正常醫療機能，且無法阻止淹水、火災等二次災害。本研究內容如圖一所示，第一部分為參考 FEMA P58 (2012)性能設計概念，以建築結構未倒塌且可修復的前提下，探討建築內部非結構耐震性能評估方法與程序，並進而規劃建築結構物附屬之非結構系統(消防管線等設備物)易損性分析；第二部分研究內容為以案例醫院為例，檢核管線損及天花板、漏水、崩塌等破壞模式之性能表現，透過數值模型分析結果建立詳細評估之易損性曲線，以提出適合工程師應用之簡化評估方法；第三部分則依據 NFPA13(2010)提出四種補強方案，進行案例醫院消防撒水管線系統之增量動力詳細分析，進而比較不同配置之性能表現。

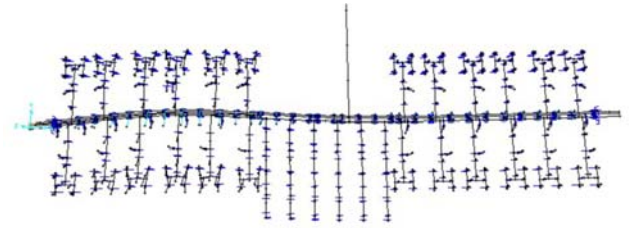


圖一 消防撒水系統耐震性能評估研究架構

為探討管線元件之易損性結果，由損壞輕微至嚴重分別定義三性能點。第一個性能點為天花板粉塵掉落，其會影響病房內部使用，損壞狀態定義為材料測試之破壞位移加上撒水頭與天花板之間隙值 1.66 公分。第二性能點為撒水接頭彎矩容量不足造成漏水災情。由一吋接頭反覆載重試驗以及振動台實驗中皆有觀察到螺紋接頭脫落，造成洩水現象，本研究以一吋螺紋接頭處之最大彎矩值 2.02kN-m 作為損壞判斷依據。第三個性能點為支撐消防管線系統之吊桿損壞，損壞狀態定義為以下兩種狀態，第一種為吊桿靠近樓板連接處在強震下因受極大彎矩而材料進入塑性階段，直到全斷面降伏則吊桿失去承重能力，或是連接吊桿與樓板之膨脹錨栓受強震後因受力超過極限強度而破壞。

本研究依據台灣中部某中型醫院消防撒水系統之原始配置，使用 SAP2000v15.0.0 軟體建立具可靠度之數值模型(如圖二，Fan-Ru Lin et al., 2019)。由於詳細數值分析十分耗時，且評估工程師可能無法取得管線設計圖，或經費不足以進行詳細數值分析，故本研究提出簡化評估方法，工程師依現地調查得到主管與支管之長度、尺寸，以及吊桿數量，即可初估整體管線頻率，再以初估頻率得其對應之 AC156 譜位移而推得主管最大位移，再利用靜力方式，評估病房子系統處管線元件破壞情形。消防撒水系統原始配置依據逐步增量分析(IDA)進行詳細評估(A 法)，其數值分析結果可進一步建置三個性能點之易損性，並建立簡易評估(C 法)所

需之參數。以漏水性能點為例，圖三左為建築週期(T_1)對應之譜加速度 $S_a(T_1)$ 為工程需求參數繪製之消防管線漏水易損性曲線，可知在小於 2g 之強度下，簡易評估法(C 法)破壞機率較大。

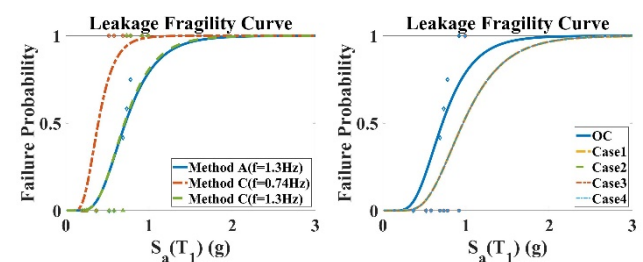


圖二 案例醫院六樓消防管線系統數值模型

本研究進一步設計四個補強方案(表一)，方案一為耐震斜撐安裝在主管，其目的為抑制主管位移，主管斜撐位置則根據醫院耐震評估補強準則報告(柴駿甫, 2015)與 NFPA 13，計算影響區域與分配載重。研究發現該方案並未能有效抑制撒水頭位移而使天花板粉塵掉落，故根據 NFPA13 另增設方案二、四等各增設支管吊架與於撒水頭增設四條鋼線，方案三則設置上述所有三類耐震補強設施。由圖三(右)可得知補強前後之漏水易損性差異。相較於原始配置(OC)，加裝主管斜撐後一吋螺紋接頭破壞機率明顯下降，而方案一、二、三與四之易損性完全重疊，表示主管斜撐為使螺紋接頭彎矩降低的主要原因，而補強後之消防管線於譜加速度中位數超過 1.08g 之地震組別皆無破壞，故由建築結構不可修復判定螺紋接頭達損壞狀態(林凡茹, 2017 年中心報告)。

表一 各方案之補強措施

	主管加裝斜撐	支管加裝吊架	撒水頭加裝鋼線
一	V		
二	V	V	
三	V	V	V
四	V		V



圖三 詳細與簡易評估(左)、補強前後(右)之漏水易損性比較

由以上結果可知，簡易評估法較為保守，此結果符合預期，因簡易評估法為簡化繁複計算之方法，然而亦增加了不確定性，故須較詳細分析法更為保守，方能提供工程師做通用性評估。依據 IDA 之補強方案分析結果，本研究後續將修正消防撒水系統簡易評估方法，提出具可信度與保守度之補強簡易評估法。

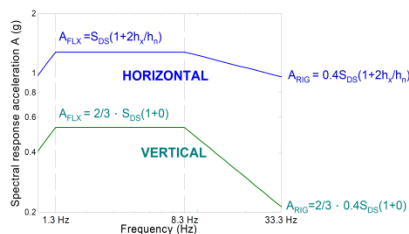
副研究員 林凡茹
專案佐理研究員 蔡詠安
研究員 柴駿甫

功能性設施耐震性能 測試驗證機制

近年來，結構物耐震設計方法與標準有了顯著的進步與改善，然而，近年來發現因地震所造成的生命財產損失，已從建築物本身轉為建築物內功能性設施(或稱非結構，如機電設備與建築裝修材等)的損壞，且功能性設施並不屬於抗震結構系統，破壞情形更為顯著。台灣目前尚無標準的非結構物耐震設計與規範，因此絕大多數非結構物之耐震能力多由測試而得。因此，本節主要介紹國震中心因應功能性設施耐震性能測試驗證需求所設計之測試構架，用以達到符合測試標準之標的。

(一) 非結構物測試規範簡介-AC 156 (ICC-ES, 2010)

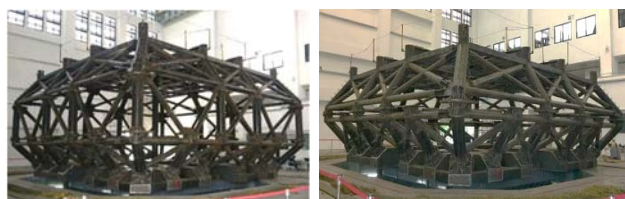
AC156 為 ASCE 7-16(SEI, 2016)認可之非結構耐震性能試驗規範之一，其需求反應譜如下圖一所示，用於驗證一般非結構構件與設備是否符合美國建築規範(IBC)之耐震設計規定。由於我國耐震設計規範之非結構設計地震力與美國相仿，國震中心參採其測試規定，並建立符合 AC156 與我國規範之測試機制。



圖一 需求反應譜示意圖

(二) 非結構測試環境建置

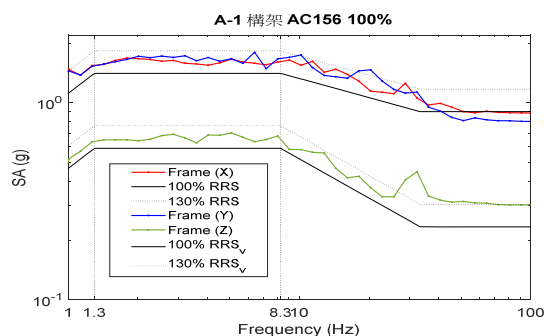
為因應型分佈式非結構系統之測試，本中心建立一組剛性框架，據以如實模擬非結構物懸吊處之樓板歷時。如圖二所示，剛性框架的高度可以調整到 4 m 或 6 m，以容納 2 m 至 4 m 懸吊高度之分佈式非結構系統進行測試，如懸吊高度較深之高科技廠房天花板系統。為了在試驗過程中進行較大範圍之試驗，剛性框架頂部和底部的懸掛區域將振動台的 8 m × 8 m 區域延伸至 10 m × 10 m，並且可懸吊擺盪之面積也達 12 m × 12 m。為了確保此框架可如實反應輸入振動台之測試波，本研究利用人造歷時 AC156 震波作為振動台輸入，擷取構架頂部反應，與需求反應譜(RRS)進行比較。圖三顯示構架部水平 X 與 Y 向之反應符合 AC156 規定，於 1.3 Hz 至 33.3 Hz 包絡 100% RRS 且未超過 130% 上限；鋼架頂部垂直向(Z)之反應，於平台段(1.3~8.3 Hz)間表現良好，僅於 30 Hz 左右之局部範圍高於 130% RRS。



(a) 6m 高

(b) 4m 高

圖二 非結構試驗之剛性框架



圖三 實驗結果與需求反應譜(RRS)比較(中間有柱構架)

助理研究員 林震宇、副研究員 林凡茹
研究員 柴駿甫

2019 抗震盃活動預告

為增進學生地震工程之防災知識，藉由競賽活動及互動式參與增進結構抗震觀念，國家地震工程研究中心自 2001 年起舉辦「抗震盃—地震工程模型製作校際競賽」，至本年度為止，已歷經 18 屆競賽，參加學生人數已超過 7500 人，參賽國際隊伍包含英國、美國、日本、韓國、紐西蘭、香港、菲律賓、新加坡、越南、印尼、印度、馬來西亞、中國大陸等，為世界上規模最大之結構抗震競賽之一。

今年比賽延續往年之規模，分成高中、大專及研究生三組，邀請國內外學生隊伍參賽。活動內容結合創意與工程應用，高中、大專之參賽隊伍需在活動期間製作抗震結構模型，通過相關耐震測試。另在研究生隊伍部分，舉辦研究生國際研討會，每隊參賽隊伍簡報該隊之設計原理與隔減震方式，並與裁判及國內外參賽隊伍交流討論，以增加競賽之教育意義。

2019 抗震盃預計將於 9 月 20~21 日假國家地震工程研究中心舉辦。19 日舉行研究生組國際研討會，各隊簡報其設計與構想並討論、溝通規則，20 日為模型製作及審查日，21 日則為模型測試、比賽日。此外對於國外參賽之學生及指導老師，於 9 月 18 日舉辦地震教育之旅，參觀 921 地震教育園區、車籠埔斷層保存園區等，以瞭解台灣的地震歷史及背景。期望透過這些活動的舉辦，能讓國內青年學子有更多國際交流機會，增進地震工程之相關知識，同時對結構耐震設計產生興趣，進而未來投入地震工程相關領域貢獻一己之力。

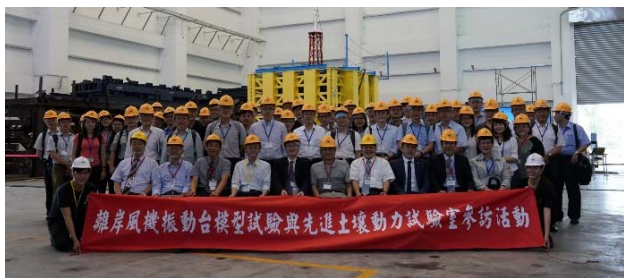
活動網址：<http://www.ncree.org/ideers/2019/>

助理工程師 陳家漢

離岸風機振動台模型試驗與 先進土壤動力試驗室參訪

在政府綠能政策指導下，我國離岸風力發電正蓬勃發展。未來 10 年內預計創造兩萬個工作機會，產業商機上兆元。然國內風機產業仍處於起步階段，為了務實建立離岸風機之專業測試技術，國家實驗研究院國家地震工程研究中心(以下簡稱本中心)臺南實驗室在科技部支持下，建置先進的土壤動力試驗室，以提升國內求取離岸風機基礎工程地工參數之試驗能量，期能提供求取離岸風機基礎設計所需大地工程參數之相關試驗。本試驗室除了一般土壤力學試驗基本設備外，更購置先進之土壤動力試驗設備，如動力三軸、共振柱、動力單剪試驗儀。也配合新一代的大型振動台，建置國內最大的雙軸向剪力試驗盒(3m 高)，可進行各種離岸風機基礎與土壤地震互制行為之相關研究。經一年半的努力，目前的建置工作大致完成。為推廣先進土壤動力試驗室與大型離岸風機模型試驗之研究，本中心、國立成功大學及臺灣離岸風機基礎暨海事工程協會將共同舉辦此活動，廣邀國內相關開發商、設計顧問公司、驗證方的專家與學者，參訪本中心水下基礎與地盤試驗平台試驗觀摩及土壤動力試驗室。

本次座談會假本中心臺南實驗室 S101 演講廳於上午 10 點由黃世建主任致詞後展開。會中本院吳光鐘副院長亦親臨致詞。活動開始時由朱聖浩副主任及劉光晏博士說明活動安排及縮尺風機模型振動台試驗。接著由柯永彥博士帶領大家觀摩縮尺風機模型振動台試驗。最後倪勝火組長與張文忠教授親自介紹各項設備與試驗性能，再引導參與人員觀摩土壤動力實驗室新建置之動力三軸、共振柱、動力單剪試驗儀等設備，分享本中心土壤動力試驗能量。本次座談會在所有參加者、主講人及相關專家學者的交流與討論下落幕。藉由此活動，期能加速提升國內離岸風電之土壤動力試驗技術與風機基礎模型試驗能力，共同促成國內離岸風機產業之成長。



圖一 參加人員合影



圖二 土壤動力試驗室觀摩

副研究員 盧志杰

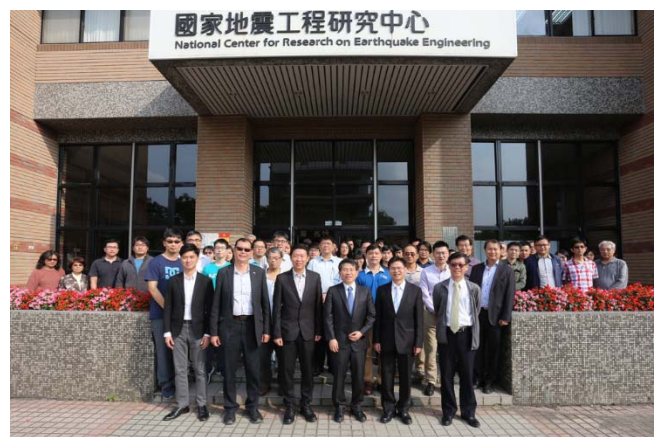
人工智慧研究中心產學交流論壇

本中心與臺灣大學土木工程學系合設的「國震中心與臺大土木系合設人工智慧研究中心」(以下簡稱 AI 中心)自去年七月揭牌迄今已近一年。基於產業界與學界的期待，AI 研究中心特於今年四月十日舉辦產學交流論壇，除本中心黃世建主任、臺大土木系謝尚賢主任、AI 中心陳俊杉主任、AI 中心韓仁毓、陳柏華、張家銘、張書瑋等四位副主任蒞臨外，另邀請台灣世曦工程林曜滄總工程師、中興工程周頌安總工程師、鼎漢工程周諺鴻資訊長、台灣智慧駕駛沈大維執行長與會演講，分享各自在其研究領域的人工智慧應用成果。



圖一 國震中心與土木系合設人工智慧研究中心於今年四月十日舉辦產學交流論壇，AI 中心陳俊杉主任致歡迎詞

論壇內容涉及業界在橋梁管理平臺、營建工程數據庫、交通旅運分析、自駕巴士、現代化空間資訊、車流參數採集、仿生材料開發、智慧結構控制等方面。出席的近百位產學界來賓均對論壇中所介紹的各項成果表示極大興趣，論壇本身更促成各單位在不同議題的合作可能。未來 AI 中心將致力成為國內外人工智慧在地震工程、防救災與土木工程相關領域的研究重鎮，持續扮演 AI 與土木工程間的橋梁角色，為土木工程界帶來新機。



圖二 產學交流論壇與會成員大合照

助理研究員 張慰慈

現地型地震預警系統 印度示範站建置

國震中心執行科技部智慧新南向計畫，預計為向印度等南向國家，推廣我國在智慧防災的新技術，藉以推展防災外交，也帶領產業拓展海外市場。國震中心主要推廣的項目之一為「現地型地震預警系統」。國震中心去年便陸續出訪印尼、紐西蘭與印度這些南向且與台灣一樣有地震災害的國家。目前已經與印度古吉拉特邦 ISR 地質研究所已經簽訂 MOU，一同在地震預警以及地震前兆等相關議題上合作。在地震預警部分，ISR 提供歷史地震資料，由國震中心進行印度版現地型地震預警模式的開發，並提供一套現地型地震預警系統，安裝印度版預警模式，進行長期驗證測試。去年 ISR 已經提供數萬筆的地震事件資料，供國震中心分析。國震中心團隊也開始著手現地型地震示範站的系統建置與實驗室測試。108 年正式帶這套「現地型地震預警系統」前往印度古吉拉特邦 ISR，位於西方的 Bhuj 是既有的地震觀測站進行安裝。由於當地並沒有固定式網路，僅有 3G 訊號以及特定的衛星通訊。此外其電力也十分不穩定，一次斷電可能會遲訓好幾天。這些現況與台灣十分不同。圖一為 ISR 的位於 Bhuj 的地震觀測站照片。此處位於一小山丘，地震發生頻繁，周遭甚少有人為與車輛震動干擾。圖二為國震中心團隊與 ISR 人員於完工時之合影。國震中心此行也提供 ISR 地震預警模式開發之教育訓練。也與 ISR 商討未來合作模式，以及地震預警系統後續在印度的擴展方式。



圖一 ISR 的位於 Bhuj 的地震觀測站



圖二 現地型地震預警系統示範站完工合影

研究員 林沛陽

2019 國家地震工程研究中心 實驗成果研討會(I)

為促進國內地震工程研究領域之發展，本中心實驗室於 2019 年 5 月 3 日舉辦「2019 國家地震工程研究中心實驗成果研討會(I)」(2019NCE(I))。本研討會邀請 2018 年中，於本中心台北與台南實驗室各測試系統(台北振動台、台南長衝程振動台、台北與台南反力牆與強力地板結構實驗室，以及台北多軸向測試系統 MATS 與台南雙軸向測試系統 BATS)中進行實驗之研究團隊，在研討會中以口頭演講方式發表最新實驗與研究成果。本研討會提供地震工程研究領域專家學者，一面對面交流分享的機會。除了研究人員透過結構實驗所得之最新地震工程領域之知識與發現外，關於實驗設計執行之諸多細節，例如實驗規劃巧思、量測儀器安排、夾具設計使用方式、實驗技術應用、實驗中所遭遇之困難挑戰以及解決方法等等，皆為本研討會之交流分享主題。經由此交流分享，除能讓國內專家學者在未來進行結構實驗之規劃與執行時能更收周詳與效率之功，亦能讓業界更加了解地震工程領域之最新研究趨勢與成果，以及國震中心可提供之服務。最後，國震中心實驗室也期待能利用此一難得之交流機會，學習在未來如何能提供更多、更符合各界期待之結構實驗服務。

本研討會共計發表 22 個口頭演講，研究主題涵蓋包括特殊同心斜撐鋼構架行為、習見鋼結構工程中電熱熔渣焊之行為、鋼板混凝土複合剪力牆之力學行為、新型結構補強方法、高台度磚牆力學行為、鋼纖混凝土柱行為與裂縫控制、鋼筋混凝土剪力牆破壞倒塌行為、橋墩與群樁基礎裸露、加黏彈性阻尼器之鋼筋混凝土構架行為、新型隔震元件材料與應用、影像量測於震後快速結構健康評估之應用、高科技廠房自動化倉儲耐震、摩擦單擺隔震系統、質量協調阻尼器應用、非結構物耐震測試、近斷層效應研究等等。本研討會參與人數約 120 位之譜，除本中心內部人員之外，計有超過 50 位來自業界與學界之工程先進與教授師生參與本研討會。

本研討會亦以簡要論文之形式，發表相關實驗與研究成果。會後亦將所有簡要論文彙集成冊，以中心報告之形式對外公開，達成國家社會支持吾人進行地震工程研究之期待。

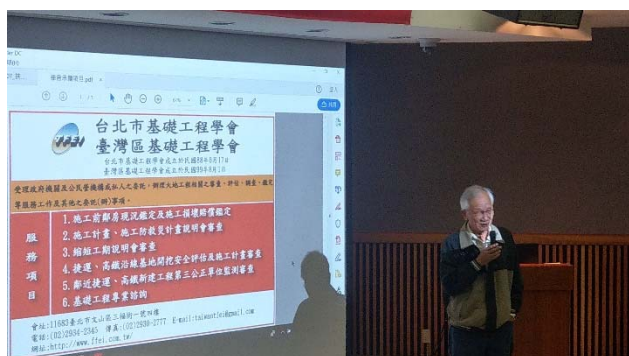


圖一 2019NCE(I) 與會來賓合照

技術師 王孔君

2019 基礎設計與施工問題 研討會

近年來，由於基礎工程之設計分析與施工技術均已大幅進步，然而隨著都會區密集開發以及交通建設工程延展至海陸深處，基礎工程所面臨的問題更具特殊性與多樣性，在設計與施工方面均面臨許多新的問題與挑戰。2019 年 5 月 2 日臺灣區基礎工程學會暨台北市基礎工程學會、台灣區基礎工程專業營造業同業公會、中華民國大地工程學會、中華民國大地工程技師公會與國家地震工程研究中心等共同籌辦「2019 基礎工程設計與施工問題研討會」。本次研討會邀請產官學研界各專家學者針對連續壁與基樁施工、盆地邊緣地區開挖擋土與支撐設計案例、混凝土材料性質於樁載重試驗結果詮釋的角色以及特殊工程之基礎問題作專題演講與討論，達到工程技術交流與經驗分享之目的。值得一提的是，本次會議特別邀請台電公司與鹿島公司代表針對 2017 年 4 月 29 日地下輸配電管線洞道潛盾施工造成八德光復路口沉陷事故，進行潛盾洞道滲漏事故緊急搶修及後續復建方案的專題演講；另外，針對金門大橋基礎設計與施工的議題邀請台灣世曦公司相關代表進行專題報告，分享台灣在都會區潛盾工程事故應變搶救復建及在海事工程所累積的實務經驗與設計施工工法，受到與會人士高度興趣以及熱烈廣泛的研討。



圖一 國震中心顧問陳正興教授與會致詞

副研究員 許尚逸

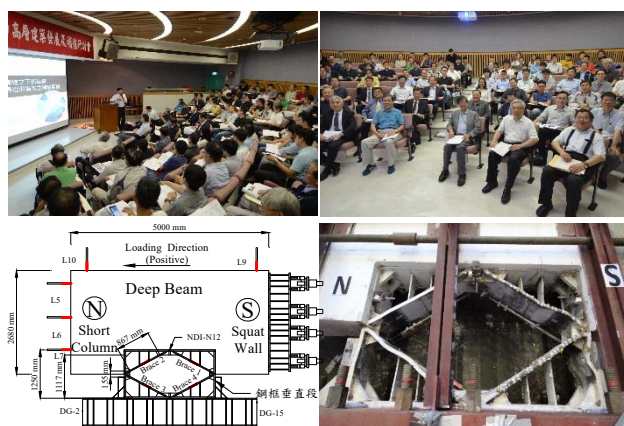
2019 高層建築發展及補強 研討會

本中心與台灣大學土木系、台灣大學地震工程研究中心、地震工程學會、結構工程學會及土水工程學會合辦高層建築發展及耐震補強研討會，主要針對高層建築的發展及既有建築補強技術進行探討，議題包含建築規劃都市更新、階段性補強、高樓建築補強技術、分析模擬、耐震實驗、健康監測、施工品管及高性能鋼材開發等，邀請的講者包含學術界及產業界從事新建及補強工程的先進專家們，針對實際工程案例進行知識及經驗的分享，以藉此提升建築結構及地震工程研究及創新研發，持續協助國家重大建設發展以達安全的居家環境。

在本研討會中，主要討論台灣高層老舊建築目前遇到的結構耐震力不足的問題，像是因為台灣的住商混合大樓經常因軟弱底層的問題而於地震中發生倒塌，住商大樓一樓經常作為公共空間使用，二樓以上則作為私人住宅，並台灣常見的騎樓柱，一樓隔間牆數量通常較上部樓層大為減少，導致建築物容易形成軟弱底層，受震倒塌之風險大大提高。「單棟大樓階段性補強技術手冊」建議建築物若有軟弱底層的問題，可於一樓開放空間進行簡易補強措施，降低建築物因軟弱底層破壞而倒塌之風險，作為階段性補強。並本研討會中介紹了實務高樓建築補強分析之案例，先進行補強構件的試驗，瞭解破壞機制及設計的合理性，再藉由結構分析程式 ETABS 進行非線性靜力側推及非線性動力歷時分析求得結構物的耐震需求，驗證補強之效益。

以實際的 24 層高樓鋼筋混凝土建築物作為研究標的，敘述各種構件測試方法及補強前後的差異性，並藉由非線性靜力側推及非線性動力歷時分析瞭解結構物於 2500 年地震迴歸期下的耐震需求。

在本研討會中，結合了學術研究分析、實務案例、都市更新及工程施工管理，期望能提供研究成果及技術給工程界參考，進一步地提升結構設計分析技術及施工品質。



圖一 研討會照片與會中報告補強構架試驗

助理研究員 劉郁芳
台灣大學教授 周中哲