



從日本的E-Defense到 建築長照建置計畫(上)

國立成功大學土木系 副教授／朱世禹



感謝三聯科技教育基金會三聯技術期刊的支持，本文將分上下兩集，上集介紹近20年來美國於地震工程與複合災害相關實驗設施的建置與研發方向。下集則介紹近20年來日本於地震工程相關實驗設施的建置與研發方向，也是筆者協助撰寫國家地震工程研究中心臺南實驗室建置計畫書的部分內容，希望藉由這個期刊能留下完整的記錄。並記載筆者近年來在南部推動建築長照建置計畫的過程，希望能引起更多社會大眾的共鳴，促成臺灣防災科技產業的創新與發展。

一、前言

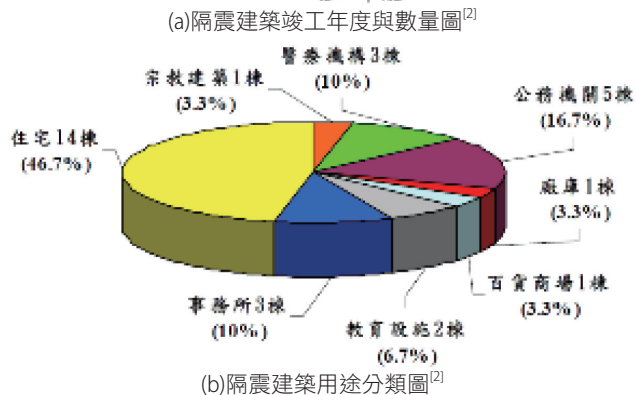
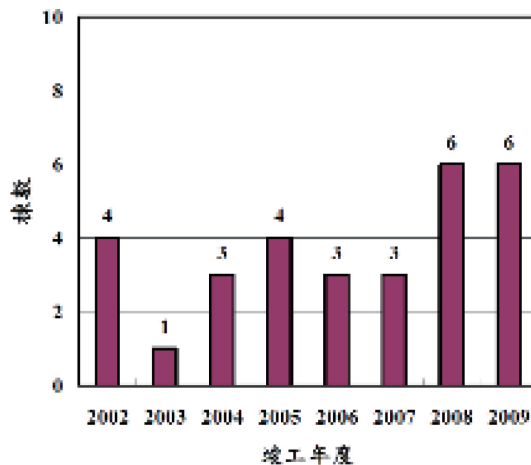
發生於臺灣時間1999年9月21日凌晨1點47分的921集集大地震造成國內重大浩劫，其中死亡人數2千多人、重傷1萬多人，建築物全倒及半倒均達5萬多棟，直接經濟損失高達美金107億元之鉅，災情空前慘重付出慘痛代價。臺灣島地處歐亞板塊與菲律賓海板塊之交會處，對台灣而言，地震是不可避免的自然現象，而以現今科技水準，地震仍無法如颱風及豪雨作準確之預測。如何在顧及成本效益原則下，增強結構物之耐震能力，避免結構物受震倒塌而使生命財產受到損失，實為社會大眾及政府必須持續面對的問題。今年為921集集地震20週年，在這20年之間，人類的科技一日千里，尤其是高科技相關產業；以與日常生活相關的手機產業為例，從2007年第一代iPhone問世，而後配合2G/3G/4G的通訊系統的演進，短短12年間，Apple已整合語音娛樂、健康照

護、生活影像及語音臉孔辨識技術於最新的iPhone XR。然而，每天替我們遮風避雨的溫暖家園面對地震的防護機制，是否已比20年前更有精進呢？

鑑於災害地震帶來之影響，二十世紀初即有學者提出結構隔震之觀念[1]，隔震之概念為在上部結構與基礎間安置一柔性介面，以阻絕地表反應上傳至上層結構，即可同時減少上部結構之加速度反應與層間變位，亦能夠減少結構物內人員的傷亡與設備之損壞。最為人之知案例為美國北嶺地震後，南加大醫院因裝設LRB隔震元件，顯著的將地震反應降低，減少結構物內人員的傷亡與設備之損壞。近年來，各類隔減震裝置之理論基礎漸臻成熟逐漸為工程實務界所接受，因此，已有許多新式建築、機場、博物館，採用隔減震裝置，來達到符合耐震、隔震設計規範及居住舒適性的要求。

二、國內隔減震方法介紹

國內近年各種隔震結構物蓬勃興建，所採用之隔震元件如鉛心橡膠支承(LRB)、高阻尼橡膠支承(HDRB)、摩擦單擺支承(FPS)、ASBD隔震系等等。其中部分建案包括了兩種以上的隔震元件系統，同時往往須配置消能元件以符合設計之要求。隔震結構物多為鋼筋混凝土結構，常用的隔震元件以LRB占大宗，為台灣最廣為使用之隔震支承元件。近年來由於基礎隔震的概念逐漸被大眾所接受，由(圖1(a))和(圖1(b)) [2]可以看出，近年來採用隔震系統的案例與日俱增，並且大多數用於住宅以及公務機關上，也因此衍生出許多新的施工條件上的問題；而都市人口集中、經濟因素及土地取得不易等等，因此中間層隔震之建築物與日俱增，也使得在近年來國內外紛紛對中間層隔震展開相關的研究和試驗。另外，根據筆者長期參與台南市大樓施工安全或特殊結構審查之統計，至2019年為止台南市地區之隔減震建築分佈圖如(圖1(c))所示，其中，有9棟屬於隔震建築，其餘多數為減(制)震建築。然而，隔減震結構設計或元件測試階段所提供之元件參數，經由施工建造完工後，隔減震建築整體之減振行為，仍需經由裝置長期監測設備以及成熟的系統識別技術，針對裝置的種類及配置方式，進行實際整體等值參數之確認，如此才能確保符合原始設計的要求，也可進一步評估未來近斷層地震作用下之效能。



▲ 圖1 國內及台南市隔減震建築現況



上述對於地震工程或結構隔減振系統之研究與發展的進程，每一研發成果均必須經過理論推導、數值模擬、實驗驗證及實體結構成效評估，以至歸納整合為設計規範，提供工程實務界廣泛應用。其中理論推導與數值模擬之研究環境及所需設備，較為簡單且經濟；當進一步必須加以試驗驗證時，其所需之試驗設備及相關軟、硬體實驗技術，不僅相對地多元化且複雜，所需之投資經費亦相當龐大。在眾多地震工程試驗設備中，反力牆與強力地板配合高性能油壓制動器或地震模擬振動台之試驗系統，最為複雜但也最能模擬試驗結構之受震實況。

三、美國隔減震方法介紹

西元1999年底，美國國家科學基金會(NSF)開始倡議一項嶄新的研究計畫，稱為「美國國家地震工程模擬實驗整合網路計畫(NEES)」；該項計畫為NSF所推動之重點研究儀器設備改進方案(MRE)之一，其他同樣列為該項方案的計畫尚有「南極觀測站計畫」、「雷射干涉儀重力波觀測計畫」與「國家天文電波觀測計畫」等等。NEES計畫著眼於近年來網際網路資訊科技的蓬勃發展，前瞻性地導入遠距觀測與遠距操控之特性，利用網路與先進之地震工程試驗儀器設備結合，並採用共同合作實驗室之規劃特色，整合實際試驗、理論推導與驗證及試驗資料集中管理等技術，並以高速電腦計算之網路支援，進行以數值模型為基底之模擬試驗技術提昇。尤其打破區域疆界的限制，讓所有地震工程相關領域的專家學者或工程實務界人士均能參與並主導相關試驗，達到充分利用國家耐震防災的資源及儀器共享、試驗結

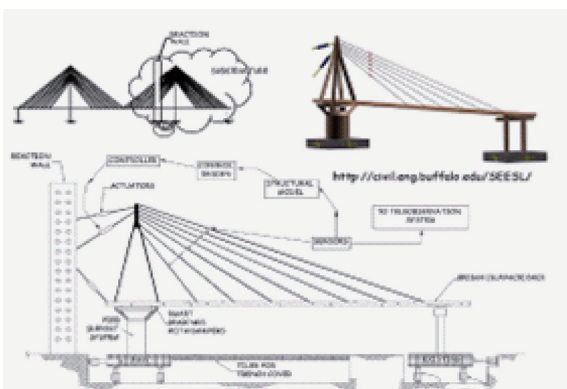
果共用之最佳效益，並增進整體社會對強震防災的研發能量。

美國NEES計畫，其總投資額約一億美元，折合約三十五億元新台幣，此計畫為美國國家科學基金會(NSF)針對下一代自然災害工程研究大型設施的建置計畫，經過2000年至2004年的設施建設階段，受補助的著名大學包括紐約州立大學水牛城分校、內華達州立大學雷諾分校、加州大學聖地牙哥分校、加州戴維斯大學、羅斯勒理工學院、奧勒岡州大學、加州州立大學柏克萊分校、科羅拉多大學、明尼蘇達大學、里海大學、伊利諾大學香檳校區、康乃爾大學、洛杉磯加州大學、德州大學奧斯丁分校等。以下針對九所著名大學的設備進行簡單的設施說明：

1. 紐約州立大學水牛城分校

在美國NEES計畫中，紐約州立大學水牛城分校擴建之「結構工程與地震模擬實驗室(SEESL)」，獲得兩項大型設備更新與添購之補助，總金額高達美金1054萬，包含了以即時複合式地震模擬動態試驗為導向之可移動高性能地震模擬雙震動台，與大尺度高性能大型油壓致動器試驗系統等兩項大型實驗室更新計畫(如圖2)；計畫中UB將原實驗室之硬體空間擴充，包含約340m²之強力地板，寬12.5m、高9m之反力牆一座，提供兩座可移動式地震模擬平台機動性調整位置之壕溝(長35m、寬4.5m、深度3m)，及緊鄰震動台壕溝之7m寬、9m高反力牆一座。該實驗室的特色為兩座(3.5m x 3.5m)六自由度可移動式地震模擬振動平台，可依據試體實際尺寸加以適度調整，進行單一或多重地震記錄輸入之試驗，此項設備對於橋墩因土

壤及地質條件影響時之受震反應之試驗尤為重要。另外，加上大型高性能動態油壓致動器與反力牆，可以將部分橋樑模型由電腦模擬，另一部分橋樑以縮尺模型置於雙振動台上，以進行以數值模型為基底之即時複合式動態試驗(RTDHT)。



▲ 圖2 紐約州立大學水牛城分校SEESL實驗室 (<http://www.buffalo.edu/seesl.html>)

2. 內華達州立大學雷諾分校

內華達州立大學雷諾分校之「大尺度結構實驗室(LSSL)」建立於1992年，原配備有二座單軸向震動台，在NEES計畫中獲得補助美金491萬，將原震動台升級為雙軸向4.35mx4.5m，衝程為30cm，並添購一座相同規格之雙軸向震動台，三座震動台(如圖3)合計可承載試驗模型總重達1.35MN，相隔距離最小

9m，最大可達36.5m，每一座震動台可獨立或同時運作，以模擬單一地震輸入或多重地震輸入之橋樑結構。



▲ 圖3 內華達州立大學雷諾分校之LSSL實驗室 (<https://www.unr.edu/cceer>)

3. 加州州立大學柏克萊分校

加州州立大學柏克萊分校之「可拆組式反力牆地震工程模擬設施(RRWESF)」，座落於Richmond Field Station，獲得NEES補助427萬美元，包含12座三英尺高之中空鋼筋混凝土塊，利用後加預力方式固定於既存之60x20英尺之強力地板上，以及620kN與560kN之動態致動器各兩支、980kN之靜態致動器三支(如圖4)。



▲ 圖4 加州州立大學柏克萊分校實驗室(<https://www.ce.berkeley.edu/testing-facilities/structures>)

應用新一代高性能數位式控制系統，配合即時電腦模擬環境，用以進行新一代複合式試驗方法之研發，該項試驗方法之基本觀念為整合實體模型與數值模擬，用以探討結構受地震作用之行為，這些試驗方法主要為80年代擬動

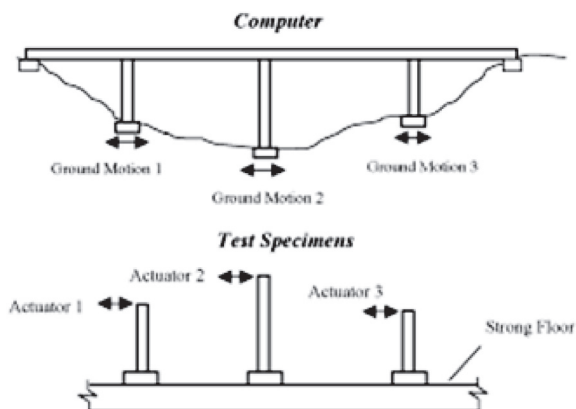
態實驗之衍生，近年來由於數位式控制理論及電腦計算速度之增強，藉由本項設施之各項設備，使得即時多重次結構擬動態試驗之方法，得以應用於地震模擬之各項實驗內容。

4. 科羅拉多大學

科羅拉多大學之「快速混合式試驗系統(Fast Hybrid Testing System, FHT)」，獲得經費補助美金198萬元，添購三支高性能動態致動器及數位式伺服控制系統，與48頻道之資料擷取系統，並更新油壓管線設備，應用原有之2800平方英尺的強力地板，配合10英尺高之鋼構反力框架，進行地震工程即時動態試驗方法之研發與應用(如圖5)。快速複合式試驗方法乃基於擬動態試驗之觀念，亦包含了實體試驗與以模型為基底之數值模擬，本試驗方法與傳統擬動態試驗最大之不同，在於能整合新型之數位控制設備與電腦模擬結果，配合快速之動態致動器，使得加載速率明顯高於傳統試驗，逼近結構受地震作用時之即時動態反應，以確切掌握試體之正確行為。



▲ 圖5 科羅拉多大學快速混合式試驗系統(<https://www.colorado.edu/center/ciest/structural-dynamics>)



▲ 圖5 科羅拉多大學快速混合式試驗系統 (<https://www.colorado.edu/center/ciest/structural-dynamics>) (續)

5. 明尼蘇達大學

明尼蘇達大學之「多軸向次結構試驗系統 (MAST)」，將安裝於明尼亞波里校區新建之試驗室，補助經費達美金647萬元，為六自由度大型試驗設備，包含十字形剛性鋼構平面反力框架，4支可提供1470kN垂直向拉力或壓力之大型致動器，以及兩組水平向大型致動器(如圖6)。



▲ 圖6 明尼蘇達大學之多軸向次結構試驗系統 (<http://mastlab.umn.edu/>)



▲ 圖6 明尼蘇達大學之多軸向次結構試驗系統 (<http://mastlab.umn.edu/>) (續)

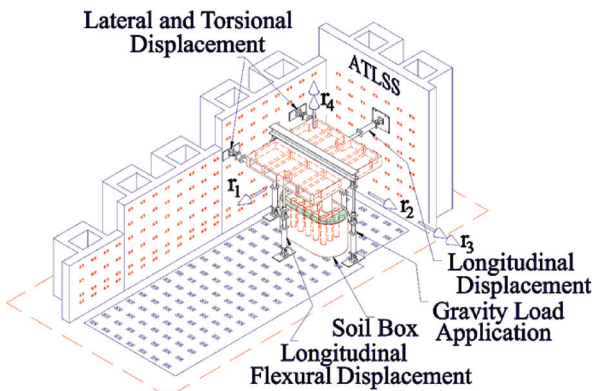
可進行大尺度結構子構件之多軸向靜態週期性載重試驗，例如樑柱接頭構件、結構牆或橋墩等；此項試驗系統之六自由度控制技術將提昇現存之試驗技巧，由簡單之單軸向邊界條件之配置，應用本試驗系統之控制程式，可提供任意自由度之邊界條件束制，實際模擬結構構件受地震作用之複雜行為。

6. 里海大學

里海大學之「即時多向度試驗系統 (RTMDT)」，配置於里海大學 ATSSS 多向度工程實驗中心，在 NEES 計畫中里海大學獲得補助約 260 萬美元，利用原有之 372 m² 強力地板與 L 形階梯狀反力牆(垂直向 15.2m 高，配合 32m 長高度由 12.2m、9.1m 逐漸降低至 6.1m)；里海大學



計畫增添下述新穎之實驗設備包括：(1)兩支配備三座400 gpm電動精密伺服閥之2050 kN動態油壓致動器，致動器衝程為 ± 500 mm；(2)三支配備三座400 gpm電動精密伺服閥之1500 kN動態油壓致動器，衝程亦為 ± 500 mm；(3)十座400 gpm高流速電動精密伺服閥；(4)油壓系統與油壓歧管系統；(5)為確保長達30秒以上之強震模擬實況，所需之油壓增壓槽與油壓蓄壓設備器(6)既有油壓設備之修改，以配合增購之油壓致動器設備；(7)配備最新即時混合式控制軟體之8頻道數位式控制系統；(8)數位式電傳視訊攝影系統，包括高畫素數位攝影機與網路攝影機、數位影像處理伺服器、實驗資料處理伺服器、限定使用者之網頁伺服器與公共網頁伺服器；(9)高速256頻道實驗訊號擷取系統；以及(10)先進的傳感器，例如：無線MEMS加速度計、壓電式應變或加速度傳感器與光纖應變計(如圖7)。主要實驗設施之設計，希望能進行多向度即時地震模擬試驗，一方面結合即時之數值分析之模擬，一方面進行實體次結構之具體試驗，藉之探查大型實尺寸結構重要構件於地震作用下之行為。



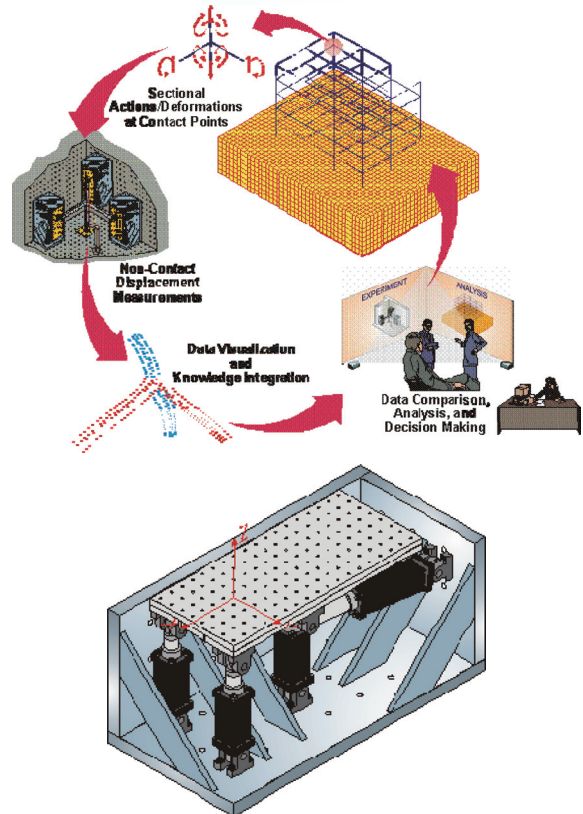
▲ 圖7 里海大學ATLSS多向度工程實驗中心 (<http://www.atlss.lehigh.edu/>)



▲ 圖7 里海大學ATLSS多向度工程實驗中心 (<http://www.atlss.lehigh.edu/>) (續)

7. 伊利諾大學香檳校區

伊利諾大學香檳校區之「多軸向試驗與模擬系統(MUST-SIM)」獲得補助300萬美元，包括三組荷重與邊界條件施加單元(LCB)(如圖8)。

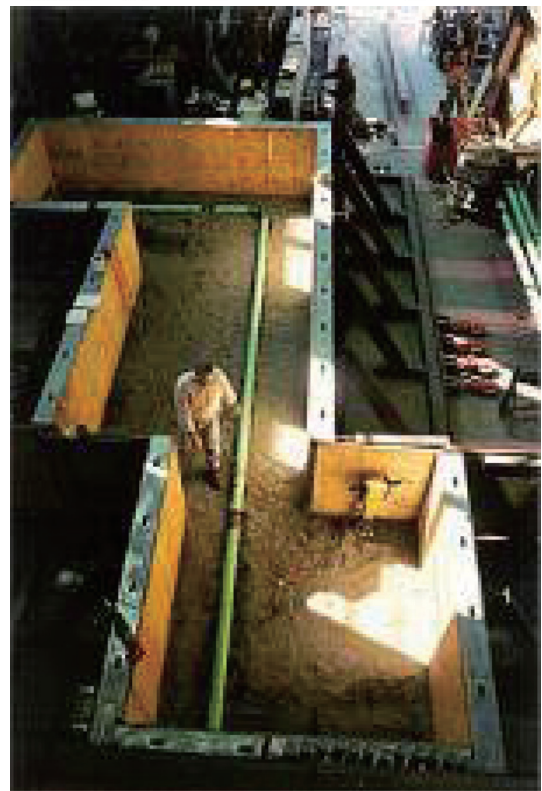
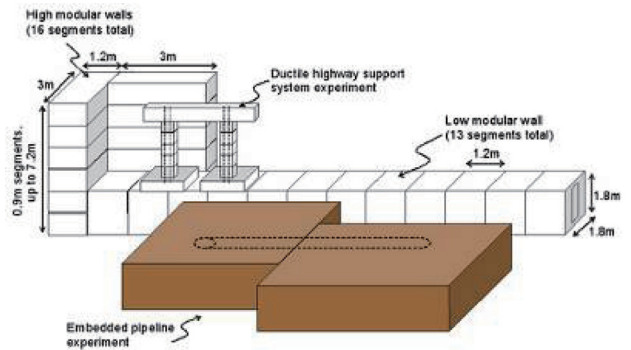


▲ 圖8 伊利諾大學多軸向試驗與模擬系統(<https://cee.illinois.edu/research/research-facilities>)

該單元利用六支油壓致動器，組成一個包含接觸面施加平台(長2.7m、寬12m)之反力盒單元(長3.6m、寬1.8m、高1.8m)，其中，3支垂直方向之致動器固定於反力盒單元的底版，提供垂直z、滾動 θ_x (roll)與前後顛簸 θ_y (pitch)之控制；兩支水平致動器連接於反力盒之側版，提供水平x與左右偏移 θ_z (yaw)自由度的控制；另外於y側向亦有一支致動器控制y方向之需求。該實驗室預計配備三具獨立之LBCB單元，共18支油壓致動器。此模組型的獨特設計，讓試驗前對六支致動器複雜的校正與設定簡化為一個整合型的單元，不僅加速實驗準備的時程，也節省許多擺置設備的空間與維護經費。此LBCB模組單元提供六項節點作動之排列組合(三個方向之剪力與三個方向之彎矩)，以及六個自由度方向的移動(三個旋轉與三個平移)；且可經由套裝之控制軟體提供正確簡單便捷的控制要求，特殊的枕形球狀支承亦能適當地讓此施力單元提供六個自由度上任意方向的力量與變形邊界條件。

8. 康乃爾大學

康乃爾大學「大尺度位移實驗設施」，為一座世界級之獨特研究設備，設置於Cornell校區內之Winter實驗室，設備經費為207萬美元，研究之焦點為一般土壤受地震作用下，所產生之大尺度位移對維生管線設施之影響，以及利用高科技先進材料所建構之高韌性地上結構之耐震成效研究與試驗。主要之研究設備配置包括：十六塊3m長、1.2m寬、0.9m高之模組型鋼筋混凝土反力牆塊，十三塊1.2m長、1.8m寬、1.8m高之模組型鋼筋混凝土強力地板塊，地下維生管線位移實驗設施等等(如圖9)。



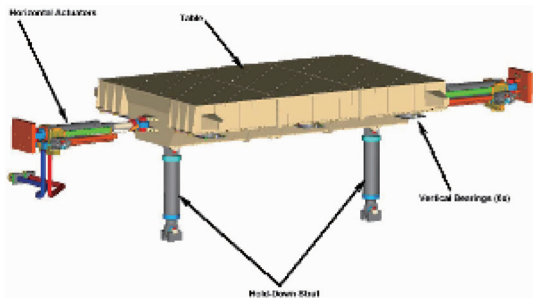
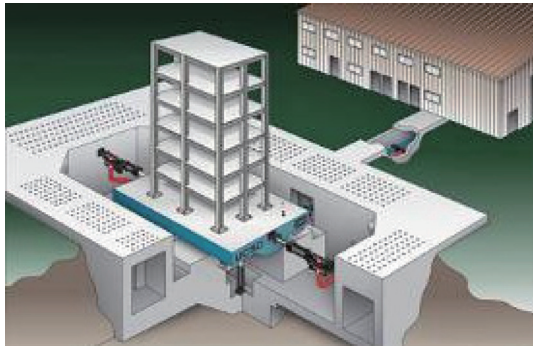
▲ 圖9 康乃爾大學大尺度位移實驗設施 (<http://nees.cornell.edu/>)

9. 加州大學聖地牙哥分校

加州大學聖地牙哥分校之「大型高性能戶外地震模擬震動平台」，座落於離主校區15公里之Elliott校區的Field Station。此大型振動台之尺寸為長7.6m、寬12.2m之單向度平台，未來可升級為六向度之地震模擬平台(如圖10)；

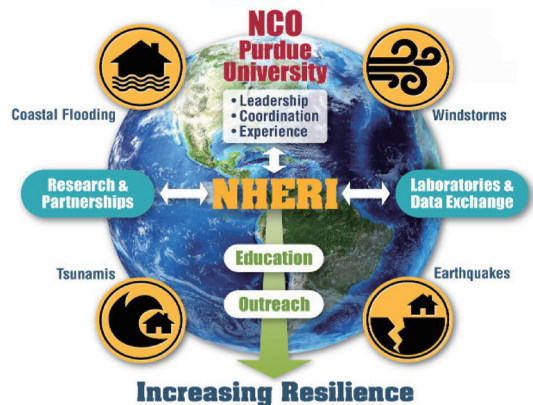


該計畫的第一階段耗費美金589萬元，設備規格為最大衝程1.5m、1.8m/sec之最大水平速度及6.8MN之水平負載，當荷載為400ton時之最大傾倒彎距為50MN-m，垂直向之最大負載為20MN。平台之有效模擬地震頻寬為0至20 Hz，除了隸屬日本國立研究開發法人防災科學技術研究所(NIED)，於日本兵庫縣三木(Miki)市世界第一大實尺寸巨型地震模擬平台E-Defense(文後將詳述)之外，UCSD之振動平台為世界上最大之戶外地震模擬實驗場所，不僅可以克服一般於室內實驗室模型試體高度的限制，若配合加州交通運輸部(Caltrans)所補助興建之大型薄片土壤剪力沙箱與兩座可回填之土壤試驗坑，則可進行實尺寸建築、隔減震系統、單跨或多跨橋梁多重輸入、結構與土壤互制、維生管線或核廢料儲存槽等不同結構與設施，於實際地震作用下之動力行為實驗驗證。



▲ 圖10 加州大學聖地牙哥分校LHP戶外地震模擬震動平台(<http://nees.ucsd.edu/>)

除了以網路為基礎之共同合作試驗系統，NEES計畫所投資興建的儀器設備，包括新型或升級更新之振動台、多用途反力牆及強力地板設施、多功能高性能動態油壓致動器試驗系統、大地工程用離心機及移動式現地試驗設備等。隨後，從2004年至2014年美國NSF繼續補助營運過程中的各項研究、創新與基礎教育的活動。而後從2015年至2019年，NSF開啟另一項五年期的自然災害工程研究大型設施計畫(NHERI)(如圖11)，除了繼續補助原NEES計畫的部分研究機構，另外因應地球環境的變遷，綜整強風、強降雨、海嘯及地震等天然災害引致的複合性災害，NHERI計畫繼續整合網絡協辦公室(NCO)，計算建模和模擬中心以及災後快速響應設施建立(RAPID)等三大項目的研究。



▲ 圖11 美國Natural Hazards Engineering Research Infrastructure (簡稱NHERI)計畫示意圖(<https://www.designsafe-ci.org/>)

(待續)