

出國報告（出國類別：其他）

2015 赴英國參加 SMiRT23 國際研討會 與參訪 Servotest 公司出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：曾盈達 副研究員

高雍超 助理工程師

派赴國家：英國

出國期間：104 年 8 月 8 日~104 年 8 月 21 日

報告日期：104 年 10 月 5 日

摘 要

本出國公差報告記述前往英國參加在曼徹斯特所舉辦的第 23 屆反應器結構力學國際研討會 SMiRT-23, (23th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology)發表論文「A Relay Fragility Test Experience of Nuclear Power Plant in Taiwan」與參訪 Servotest Testing System 公司討論三軸向振動台規格及 PULSAR 測試軟體使用問題之經過與心得。參加 SMiRT-23 研討會除了發表有關電驛 fragility 測試經驗論文，並聽取與工作專長有關之土壤結構互制分析之相關專題演講及討論，了解新近土壤結構互制分析研究趨勢為在時域分析土壤及結構之非線性反應，以解決強烈地震時頻率域分析無法準確的土壤及結構非線性反應，但一些研究報告也更確認 SASSI 程式在頻率域執行土壤結構互制線性分析的準確性。與 Servotest Testing System 公司技術專家討論結果，除了解本所提出之新三軸向振動台規劃規格在振動台設計上實際可能遭遇的限制與優缺點外，Servotest 公司亦允諾就本所幾種需求規格提出系統需要空間與報價，以便本所依本身條件找出規格及所需經費最佳組合，適當完成新三軸向振動台規畫。至於 PULSAR 測試控制軟體使用上的改進，也獲得回覆可更方便耐震測試工作的執行。

目 次

摘 要

(頁碼)

一. 目 的	1
二. 過 程	2
三. 心 得	13
四. 建 議 事 項	16
附錄一 振動台照片、設計簡圖	18

一、目的

本次出差前往英國之主要目的包括參加在該國曼徹斯特所舉辦的第 23 屆反應器結構力學國際研討會 SMiRT-23, (23th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology)發表論文「A Relay Fragility Test Experience of Nuclear Power Plant in Taiwan」與參訪 Servotest Testing System 公司討論三軸向振動台規格及 PULSAR 測試軟體維護問題。SMiRT 係每兩年舉辦一次之核設施在結構及力學方面的國際研討會，本次參加該會議除了發表有關電驛 fragility 測試經驗論文，並聽取與工作專長有關之土壤結構互制分析之相關專題演講及討論，蒐集此領域新近發展趨勢之資訊，以助核電廠耐震安全相關研究工作之進行。參訪 Servotest Testing System 公司則就規劃中新三軸向振動台規格之可行性與現有振動台測試控制軟體 PULSAR 使用上可改進問題與該公司技術專家討論。除了討論本所提出規格在振動台設計上實際可能遭遇的限制與優缺點，並希望 Servotest 公司就本所幾種需求規格提出系統需要空間規劃與報價，以便本所依本身條件找出規格及所需經費最佳組合，適當完成新三軸向振動台規畫。至於 PULSAR 測試控制軟體使用上的改進，期望能更方便耐震測試工作的執行。

二、過程

本次公差自 104 年 8 月 8 日起至 21 日止共計 14 天，相關重點工作內容如下：

月/日(星期)	工作內容重點
8/8(六)	晚間由桃園機場飛往英國倫敦
8/9(日)	上午抵達倫敦，搭火車往曼徹斯特，向 SMiRT 大會報到
8/10(一)	出席 SMiRT 開幕式及專題論文發表討論會議
8/11(二)	出席 SMiRT 專題論文發表討論會議
8/12(三)	發表論文及出席 SMiRT 專題論文發表討論會議
8/13(四)	出席 SMiRT 專題論文發表討論會議
8/14(五)	上午出席 SMiRT 專題論文發表討論會議與閉幕式，下午搭火車往倫敦
8/15(六)	整理討論資料與演練討論發言
8/16(日)	整理討論資料與演練討論發言
8/17(一)	參訪 Servotest 公司，討論三軸向振動台技術規格
8/18(二)	參訪 Servotest 公司，討論三軸向振動台技術規格及參觀驅動器組裝工廠
8/19(三)	參訪 Servotest 公司，討論 PULSAR 測試控制軟體使用改進問題及維護合約
8/20(四)	由倫敦搭飛機回國
8/21(五)	飛抵桃園國際機場

(一) 參加 SMiRT-23 國際研討會

SMiRT 是每兩年舉辦一次(第一屆於 1971 年在德國柏林舉辦)，本次為第 23 屆，在英國的曼徹斯特的 Lowry 會議中心舉行。本屆 SMiRT 研討會整體主題為 "Using existing challenges to champion the Next Generation"，沿襲以往標準技術主題，分為以下 10 個 technical divisions：

Division 1: Mechanics of Materials

Division 2: Fracture Mechanics and Structural Integrity

Division 3: Applied Computations, Simulations and Animation

Division 4: Characterization of Loads

Division 5: Modeling, Testing and Response Analysis of Structures, Systems and Components

Division 6: Design and Construction Issues

Division 7: Safety, Reliability, Risk and Margins

Division 8: Issues Related to Operations, Inspection and Maintenance

Division 9: Waste Management, Fuel Cycle Facilities and Decommissioning

Division 10: Challenges of New Reactors

跟其他大型的國際研討會一樣，本屆SMiRT也安排了貴賓作所謂的 plenary session(PS)與 Division Focused Sessions(DFS)演講，分別是以下的21場：

PS1：Small Modular Reactors

PS2：Flooding Hazards Post-Fukushima

PS3：New Build and Harmonisation of Codes and Standards

PS4：Future Perspectives in NPP Material Ageing

DFS1：Nuclear Applications of Graphite-Workshop

DFS2：High Density Polyethylene Piping

DFS3：High Temperature Assessment Workshop

DFS4：UK Forum for Engineering Structural Integrity (FESI)

DFS5：Engineering Analysis and Simulation Competency in the Nuclear Sector

DFS6：Developments in Seismic Isolation

DFS7：Linear and nonlinear SSI analysis

DFS8：Seismic Qualification Utilities Group (SQUG) Panel Session

DFS9：Honouring and Remembering John Stevenson

DFS10：Time Domain Non-linear Seismic Soil-Structure Interaction

DFS11：International Research and Codification Activities for Steel-Paste Concrete

Structure

DFS12 : State of the Art Paper on Component Fragility of NPP

DFS13 : Design Extension Conditions

DFS14 : Risk-informed Regulatory Framework for External Hazards

DFS15 : NUGENIA and Integration of National R&D Programmes

DFS16 : Decommissioning-Current Situation of Fukushima; Current Research

Activity (Japan and

International).

DFS17 : Concrete Degradation Mechanism

各technical division或PS、DFS的演講於8/10開幕式及一些專題演講後於下午正式展開，共872篇論文發表，。由於 Plenary Session 或其他 Division Session 及 Division Focused Sessions是同時多場次併行，因此只能就與工作或專長有關的演講及論文發表場次參加。每一場次有4至6篇論文發表及討論，參加場次如下：

8/10(星期一)：開幕式及核能組件結構完整性、合作下之核能永續性、英國核能工業管制之挑戰等專題演講；Div. V, Seismic Re-evaluation.

8/11(星期二)：Div. V, Seismic Advanced SSI Techniques；Div. V, Seismic Qualification；Div. VII, Seismic Margins Method；Div. VII, Development of Fragility on Techniques.

8/12(星期三)：Div. VII, Fragility and Experience Data, 發表論文「A Relay Fragility Test Experience of Nuclear Power Plant in Taiwan」；Div. V, Site Response；Div. V, Modeling Considerations in Response of Structures；Div. III, Embedment on SSI Response.

8/13(星期四)：Div. V, Linear and Nonlinear SSI Analysis；Div. V, SQUG Panel Session；Div. V, Seismic-SSI Response and Considerations；Div. VI, Fastenings and Anchorages.

8/14(星期五)：Div. V, Time Domain Nonlinear Seismic Soil Structure Interaction 及閉幕式。

4 天半的研討會議程，超過 800 篇的論文發表，每個時段有 11 個場次的 Division Session 同時在不同的會議室進行，各場次的 Division Session 參加人數

約 20~30 多人，Plenary Session 及 Division Focused Sessions 參加的人數較多大概都超過 50 人。因會議的論文全文及目錄已由大會製成隨身碟發送給註冊參加者，且由筆者回國後移送本所圖書館，可由各專長領域有需要的人員查詢參考，故本報告僅就筆者本身工作領域之土壤結構互制分析與螺栓錨定相關研究論文及筆者發表論文的概況做摘要記述。

1. 8/12(星期三)論文發表

論文題目為「A Relay Fragility Test Experience of Nuclear Power Plant in Taiwan」，作者為曾盈達、高雍超、張偉芳，由曾員代表報告，被安排在 8/12 早上 Division VII, Fragility and Experience Data 的 session 發表。曾、高二員在前兩晚均就演講投影片內容再度檢視修訂並稍事演練。該場次共有 5 篇論文發表，到場發表者有 3 位，曾員是最後一位發表者，chair/co-chair 分別為 Dr Seichiro Fukushima(TEPCO, Japan) 與 Dr Masoud Zedah(Risk and Reliability Engineering, USA)，報告時圖照如下。



發表內容為本所地震平台測試實驗室如何規劃與執行電驛之耐震度(fragility)測試，以及測試結果的發現。報告後有兩人提問，惟兩位提問者均忘記先自報身分。一位問及核電設備耐震需求(seismic capacity demand)提升若超過振動台性能，貴實驗室如何應對？ 回答應急方案(contingent plan)為設計高頻與低頻 adaptor 夾

具，分段完成測試，否則只有用分析法驗證，目前正規劃性能更好之振動台以應未來設備耐震規格提升之需求。另一位提問電驛測試需求反應譜參考規範與如何制定，則依投影片再作更詳細說明。回答後因無人再提問，兩位主持人對 3 位報告者亦都無問題，主持人宣布該 session 結束。

2. 土壤結構互制分析研究之發展趨勢

美國 NRC civil section chief Mr. Jim Xu 報告「Challenges in the SSI for new reactor reviews」，述及 shallow & deep foundation、uplift、inertial interaction effects、control point、multiple time history analyses 等審查重點方向。日本東大 Hori 教授報告超級電腦在 nonlinear SSI 的應用，使用 88128 顆 CPU，可處理分析 400 億自由度(DOF, degree of freedom)，速度比 10 年前快 1000 倍。美國 Idaho 國家實驗室與 Buffalo 州立大學則先以 SASSI(頻率域分析)驗證 LS-DYNA 程式(時域分析)在線性分析結果上一致，再比較於非線性分析上之差異；2 組地震歷時尖峰加速度分別為 0.06 g 及 0.64 g，分析模型包括 1 樓與 2 樓結構物，stick model，土壤與結構接觸則包括連結與可分離兩種模式。結論為線性分析上 SASSI 與 LS-DYNA 一致，基礎 gapping 與 sliding 則導致結構非線性反應之顯著影響，線性分析會低估結構之反應。Idaho 國家實驗室亦在研究發展 nonlinear SSI 之標準分析程序，也提出另一篇 SASSI 與 LS-DYNA 作非線性分析結果之比較論文，結果卻是高地震力結構之非線性反應大部分頻率點 SASSI 大於 LS-DYNA，該論文亦提出消除 error 的一些論點與 impact 觀點。德國能源技術公司則做了 SASSI 與 ABAQUS 分析之比較，結論為分析結果相近，但使用 ABAQUS 分析所需時間較長。法國 EDF 公司報告題目為「Dealing with nonlinear SSI in nuclear facility design process」，認為土壤 equivalent approach 可擴充，3D 非線性分析仍有困難，也提及日本核電廠強震後土壤阻尼值下降的實例。

3. 螺栓與錨栓

關於螺栓與錨栓在核能電廠的應用，包括考慮不同拉力作用下應用於核能電廠安全相關結構之擴孔錨栓(undercut anchor)之反覆裂縫測試(crack cycling tests)、核能電廠用螺栓通過設計基準事故與嚴重事故(severe accidents)作用下之驗證、反應器熱交換機支撐耐震提升設計、錨栓固定之時域動態測試配置等論文。

錨栓固定之時域動態測試配置報告目的在探討後置型擴孔錨栓在混凝土開裂下，以動態測試檢核錨栓的承載力(load bearing capacity)與使用性(serviceability)。該研究起源於 2006 年德國核能電廠在例行停機檢查時發現部分擴孔鋼材錨栓失效，在後續檢查時發現有更多同型錨栓有不合格的情形，因此引發關注。依照 ETAG 001 設計程序，設備與錨栓固定的設計條件乃基於設備在線彈性範圍、以及剛性固定(rigid fixture)條件。測試實驗考慮混凝土開裂下，模擬錨栓分別在垂直向和水平向有間隙時，以自由振動檢視此固定條件下上部結構的自然頻率變化，其中一例為混凝土具裂縫，錨栓垂直向間隙 0 mm 和 3 mm 兩種條件下，上部結構自然頻率分別為 4.44 Hz 和 2.38 Hz。另外，考慮混凝土開裂 0.4 mm 下，比較重新鎖緊和不重新鎖緊錨栓拉力分別為 15.45 kN/16.35 kN 與 6.87 kN/13.46 kN，隨後進行自由衰減測試(free decay test)，自然頻率分別為 3.84 Hz 和 3.64 Hz，測試後錨栓拉力分別為 8.75 kN/12.19 kN 與 4.73 kN/3.74 kN，顯見不重新鎖緊錨栓，在動態測試後拉力大幅下降；另一個開裂至 0.8 mm 的測試，不重新鎖緊錨栓拉力為 0 kN/0 kN，隨後進行自由衰減測試，自然頻率分別為 2.27 Hz，測試後錨栓拉力為 0 kN/0 kN。此研究提供錨定螺栓的固定條件對上部結構的影響。

(二) 參訪 Servotest 公司

本次參訪 Servotest Testing Systems Ltd (以下簡稱 Servotest 公司)的目的在確認規劃中三軸向振動台規格之可行性，並希望 Servotest 公司就幾種需求規格提出系統需要空間與價格，以便本所依本身條件找出規格及所需經費最佳組合，適當完成新三軸向振動台規畫。另外亦安排討論該公司所提供 PULSAR 測試控制軟體使用上的一些問題，期望能予解決，更方便測試工作的執行。

地震平台測試實驗室多年前即有較大尺寸(3 平方米)三軸向振動台取代目前單軸向小尺寸(90 平方公分)之建議與計畫，103 年底更積極地開始著手細部規格規劃，透過英國 Servotest 公司轉介，與寶克測試 BBK Testing Systems (以下簡稱 BBK 公司)張延伸總經理以電子郵件及電話方式進行初步討論。位於北京的 BBK

公司自 1997 年以來即為 Servotest 產品中國獨家代理公司，隨著中國的經濟發展，加上核能電廠的陸續興建，Servotest 透過 BBK 將地震模擬系統相關產品銷售到中國學術單位、政府機構與工業界。BBK 公司依據本所地震平台測試實驗室所提供國內核能電廠耐震測試所需求振動台之加速度、速度及位移參數，與未來可能興建位址之平面尺寸，提出現行 Servotest 多軸振動台(Multi Axis Shake Table)規格在經濟考量下之可行方案，並提出初步振動台設計平面圖。初步由於在構想規格上已對振動台設計上造成問題，因此，將電廠屋頂等位置之樓板反應譜剔除後，以地震波方式提供 BBK 公司進行評估，最後得到以上海發電設備成套設計研究院(SPERI)的振動表現規格為藍圖的初步結論。BBK 公司在本次參訪行程前，將前述討論結果以及四個電廠的三向地震波轉交英國 Servotest 公司做進一步規劃，本次 Servotest 公司參訪即對此規畫進行更詳細的討論。

1. 8/17(星期一)

8 月 17 日，第一天由 Mr. George Taylor, Managing Director 接待，偕同 Mr. Nick Richardson, Sales Manager 及 Mr. Glen Wardrop, System Engineering Manager 開會討論。Mr. Taylor 了解到我們自去年底以來與 BBK 公司之間討論內容以振動能力為主，簡報中以 Servotest 振動台產品實例介紹振動台設計形式，包括印度 2 例、中國 13 例、英國 1 例和法國 1 例，附錄二為簡報中提供印度、中國共 16 個實例(綜合第 2 天 Mr. Ferris 簡報資料)之照片或設計簡圖資料。振動台平面形狀以方形或矩形為主，其他如河海大學水下地震台，印度英甘地原子能中心的方形台面具圓形中空振動台。

推動振動台的水平向驅動器(actuator)與平台邊夾角有 90 度、45 度、0 度三種，除了有場址平面區域受限、或單一水平方向在振動量上或推力上有較大需求等其他考量，通常以呈 90 度夾角方式進行設計，典型的例子如印度 CPRI 振動台。其中，振動台需坐落在反力塊上，場址平面區域除了考量振動台尺寸外，還要加上驅動軸向外延伸長度，再加上固定驅動軸所需的混凝土厚度，前述尺寸加總即為反力塊平面尺寸。此外，45 度、0 度兩種夾角設計，振動台為了延伸一塊

區域與驅動器接合，也增加了振動台重量。振動台材質以鋼為主要選擇，部份為了減輕重量而選擇鋁製材質，但其造價較鋼貴，強度也比鋼材低，表面容易受損。

會議中也討論到根據我國 4 個電廠樓板反應譜所建立的 4 組地震波，同時具有大衝程(水平向 222 mm、垂直向 180 mm)、高速度(水平向 2.7 m/s、垂直向 2.5 m/s)、高加速度(水平向 5 g、垂直向 7.4 g)，驅動器瞬間供油需求量大，相對馬達、泵浦的馬力、供電需求也更高，考慮台灣地處亞熱帶地區，搭配的冷卻系統必須有效將油溫控制在攝氏 55 度的最高運轉油溫以下。相關議題將於第二天與 Servotest 公司最具經驗的 Mr. Ferris 進一步討論。

Mr. Taylor 也帶我們介紹公司內各部門的工作情形，零件多委由其他工廠製作，因此公司內部沒有工廠生產線，以下照片之驅動軸已是半成品，準備進入試驗功能階段。



Mr. Taylor 提到過去十幾年，中國陸續派員到英國 Servotest 公司訓練。而近年來，由於英國年輕人崇尚光鮮、高薪的工作，例如訓練後的員工轉向一級方程式賽車場工作，人才留失，漸漸形成年齡上的斷層。現階段，中國團隊的技術日

益成熟，轉為英國 Servotest 公司將新人送到 BBK 公司訓練。會議尾聲時，曾到本實驗室執行地震平台維護工作的工程師 Mr. Daya Nagaratnam，在完成外地客戶維護工作後與我們做短暫會晤。

2. 8/18(星期二)

8 月 18 日，第二天由 Mr. Brian Ferris, Asia Pacific Sales Director 主導，偕同 Mr. Nick Richardson 及 Mr. Glen Wardrop 開會討論。

Mr. Ferris 首先介紹 Servotest 以測試市場的顧問公司成立於 1958 年，目前 70 % 以上的員工為工程師，主要著眼於伺服液壓振動 (servohydraulic vibration)、疲勞測試 (fatigue test) 和振動模擬 (motion simulation) 三個市場方向。並簡單介紹 BBK 公司在北京通州區中關村科技園區的新設施，伺服液壓小組有 30 名員工。近期計畫包括中國地震局工程力學研究所地震工程與工程振動國家開放實驗室的雙振動台 (5 米 x 5 米及 3 米 x 3 米)、成都理工大學振動台 (6 米 x 4 米)、工信部電信研究所振動台 (2.5 米 x 2.5 米)、中南大學振動台 (4 米 x 4 米)、河海大學水下振動台 (直徑 5.6 米)、蘇州科技學院振動台 (6 米 x 8 米)、印度英甘地原子能研究中心 (6 米 x 6 米具圓洞直徑 3.5 米，並與既有 3 米 x 3 米振動台整合)、上海成套院振動台 (2.5 米 x 2.5 米) 等。

延續第一天的討論內容，Mr. Ferris 指出垂直向加速度超越 7 g，在驅動器作動頻率達 60 Hz 下，水平向驅動軸會隨著垂直向驅動軸產生的振動一起振動，當水平振動軸的自然頻率接近作動頻率，會對水平驅動軸造成傷害，因而提出頂桿 (stinger) 概念，也就是，將驅動器固定在反力塊不隨振動台振動，透過頂桿將推力傳送到振動台的方式。加裝頂桿的設計會加大反力塊尺寸，反力塊亦須設計人孔以便於接近驅動軸進行維修工作。

核能電廠的耐震需求，除了考慮樓板反應譜外，還需考慮管路上設備 (line mounted equipment) 三個軸向分別以單軸進行 RIM (required input motion) 耐震需求 (測試頻率範圍 2 Hz 至 32 Hz)，核三廠曾提出 9 g 的管路耐震驗證案。

對此，在 Mr. Ferris 說明頂桿後，提出三軸向均須各自能達到 9 g 的測試能力需求，Mr. Ferris 表示在完成各項要求討論後，再進一步作細部分析方能決定採用頂桿與否。討論中也請 Mr. Frank Blows, Chief Engineer 一起討論。供電需求的問題可採取設置配電站方式解決，Mr. Ferris 認為等整體設計完成後再行確認即可。

最後雙方將設計內容討論後，決定規格為 3 米 x3 米振動台、地震波測試之設計載重(payload) 2 噸、RIM 測試之設計載重 1 噸、水平向最大振動量 9 g、2.67 m/s、222 mm、垂直最大振動量 9 g、2.5 m/s、180 mm。Mr. Ferris 說明將依此規格計算驅動器振動參數後決定設計方向，再提出概念設計、系統及設備、三軸向振動台實驗室設計圖，相關設備報價等資料。以此作為本日會議結論。

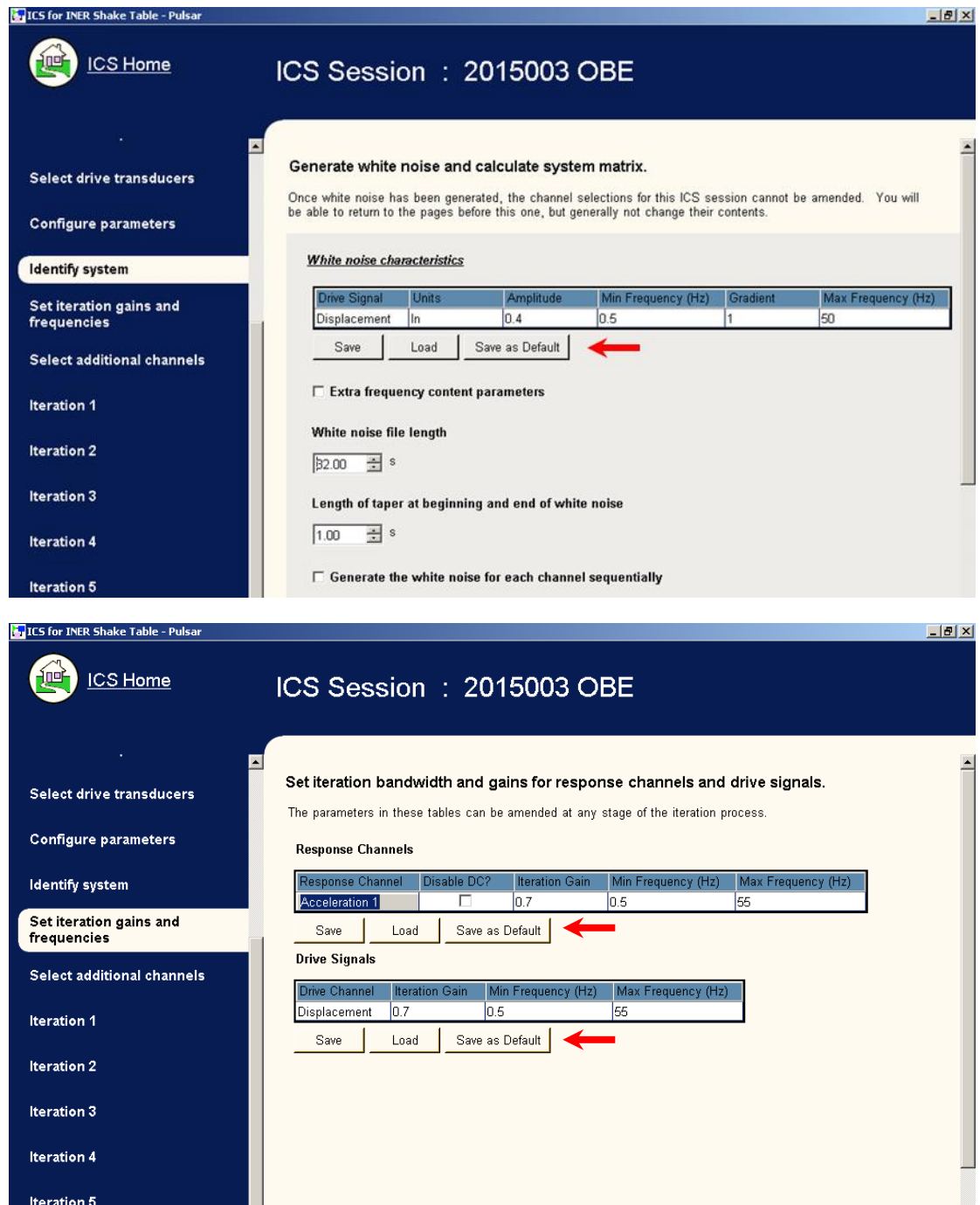


左側為 Mr. Wardrop;右側由遠而近為 Mr. Richardson、Mr. Ferris 和 Mr. Blows

3. 8/19(星期三)

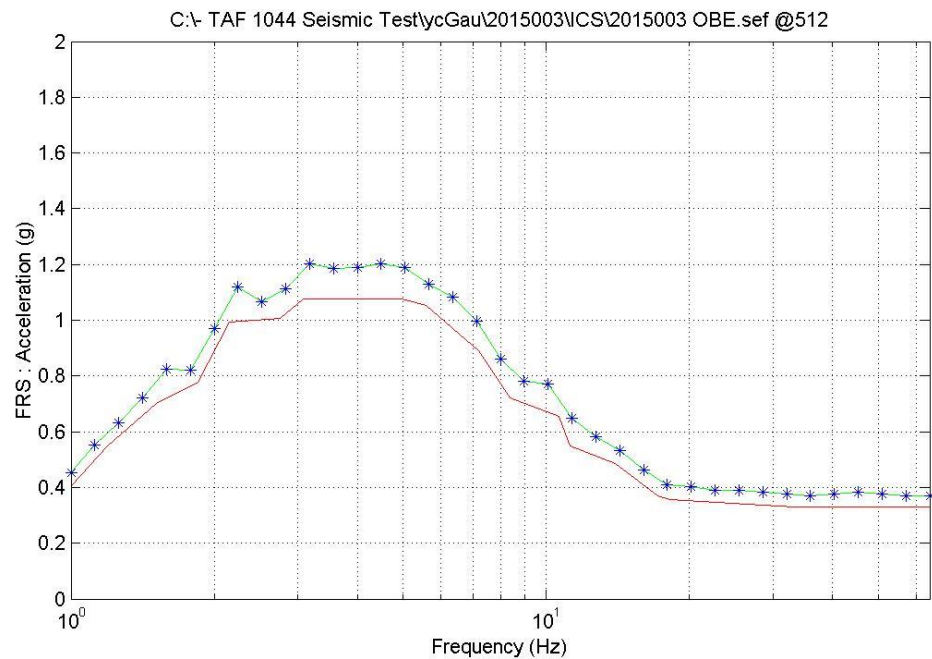
8 月 19 日，第三天與 Mr. Glen Wardrop 討論 Pulsar 使用上的問題。Mr. Wardrop 說明目前有新版 Pulsar，因應三軸向振動台用戶使用回饋，新增許多參數設定便捷功能。本所既有振動台為單軸控制，不用進入複雜的系統參數控制。

以 ICS 控制功能建立測試波的驅動訊號(drive signal)的測試流程中，部分設定也可將輸入參數直接儲存為預設值，以便於未來設定輸入，以下為本實驗室更新 Pulsar 軟體後所擷取的操作畫面，紅色箭頭指出新增功能。



執行耐震測試時，測試波計算測試反應譜的視窗中增加顯示計算反應譜頻率點的功能，以便於測試後判斷測試反應譜是否涵蓋需求反應譜，如圖中綠色線段

上藍色 “*” 標示反應譜頻率點。



最後，關於振動台系統的量測不確定評估如何考量的問題，Mr. Wardrop 認為振動台系統以加速度控制波建立的驅動訊號控制振動台振動行為，系統運作過程中油壓、驅動器內的位移計(LVDT)等控制過程，最後得到的加速度反應即以系統擷取固定在振動台上的加速規訊號為代表，因此，加速規為主要量測不確定度來源。儘管如此，自訊號擷取系統到驅動器的位移計仍需定期校驗，以獲得穩定的控制效果。

三、心得

參加第 23 屆反應器結構力學國際研討會 SMiRT-23 與參訪 Servotest 公司之心得歸納如下：

(一)發表論文時聽者提問的意向與土壤結構互制分析(SSi, Soil Structure Interaction)研究注重 nonlinear，都顯示近年來自然界發生地震超過核電廠設計地震的結果受到世界各國的重視。如何訂出適切的核電廠地震安全標準各國尚無定案，目前國內參考美國作法以 RLE(Review Level Earthquake, 核電廠設計地震乘以 1.5~1.9 係數)執行地震餘裕安全評估(SMA, Seismic Margin Assessment)重行審查運轉核電廠廠內安全停機路徑之系統的結構與設備耐震能力，並作必要之改善。不管是 SMA 或 SPRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment)對設備之 fragility 的評估，均需以土壤結構互制分析重行計算之樓版反應譜為依據，才能有正確之結果，故本所目前發展 SSI 分析技能係掌握關鍵環節應持續發展。另因設備耐震規格的提升，其測試驗證也須更佳性能的振動台才能執行，故規劃並興建新振動台以因應，對核電及防災在設備地震安全上有特別的意義。

(二)SASSI 程式係美國核能安全管制委員會 NRC 認可之土壤結構互制分析程式，一般認為僅適用線性範圍分析，即地震強度不高時，在強震時則土壤與結構可能進入非線性反應，拜電腦運算速度增快與新的 solver，nonlinear SSI 之研究已是趨勢。目前有關嘗試係應用 LS-DYNA 與 ABAQUS 在時間域做非線性分析，可得出結果但亦無法驗證結果之正確性。其實 SASSI 亦可執行土壤之 secondary nonlinear 分析，另結構上樑、柱之 shell 元素也可以曲率變化輸入材料性質作非線性分析，較簡捷方法則是以 SASSI 求出彈簧係數後，在 SAP 作結構之非線性分析。震測分組目前使用客製化 SASSI 程式(使用者介面功能較易入門)，正進行核二廠反應器廠房之建模與分析研究工作。

(三)螺栓應用於核能電廠的概況，至少十萬隻螺栓存在於核能電廠的管路系統、

電纜托架系統或通風系統等。依應用要求，可區分為非安全相關和安全相關兩個類別，用來固定安全相關元件或結構於混凝土結構上的錨栓必須符合安全相關要求。固定於混凝土結構的錨栓也可分為兩類；一為預置錨栓；另一為後置錨栓，包括膨脹錨栓(expansion anchors)、擴孔錨栓(undercut anchors)、黏著錨栓(bonded anchors)等三種。根據安全需求，必須確保安全相關元件的穩定性(stability)、完整性(integrity)及功能性(functioning)，錨栓之重要使用性(serviceability)需求即為錨栓變形量限制，依德國核能電廠 DIBt-Guideline (2010)，單一剛性錨栓在各方向的變形量不得超過 3 mm。

(四)透過與 Servotest 工程師的討論，除了確認規劃三軸向振動台加速度、速度、位移及負載(payload)規格，亦學到尚有許多技術上的因素需考量。包括驅動器使用 single end 或 double end 之優缺點，驅動器的配置，驅動器的自然頻率對測試的影響，驅動器的油封與軸承，驅動器是否使用 stinger 以避免垂直向引入的振動；固定式與浮動式反力塊的優缺點，固定式反力塊產生振動對周圍環境振動的影響值，油壓動力系統大小及整個配置所需的空間，冷卻系統，驅動器採固定於反力塊所需人孔維修空間等等，未來如欲採購，這些均有必須擇要列入規範中。

(五)英國政府已廢止 65 歲為退休年齡的相關規定，員工可以持續工作，直到自願退休。Servotest 工程師 Mr. Ferris 和 Mr. Richardson 已過退休年齡，仍繼續在職場提供豐富的經驗，其中 Mr. Richardson 住家離公司路程超過 1 小時，他可選擇在家工作，每週 1 到 2 天到公司與同事討論，以避免長期舟車勞頓。我國少子化對人力市場的影響將漸趨嚴重，因平均壽命增加，未來 65 歲之人員相信仍將維持有工作能力，參考英國作法如不限齡退休，不但資深人員經驗可繼續傳承，對我國之就業市場人力亦有幫助。

在此感謝 Mr. Taylor 和 Mr. Ferris 提供簡報電子檔，使本報告得以詳實提供 16 個振動台的照片或設計圖資訊，如附錄一。

四、建議事項

由本次出國心得，有底下三項建議：

(一)由此次參訪 Servotest 公司對振動台的設計技術有更進一步的了解，也對規劃中三軸向地震平台的規格有更清楚的確認，可以說如欲興建新的振動台，持續並深化本所在設備耐震測試與地震安全的研究，建購新三軸向振動台的藍圖已勾勒而出，接下來就是付諸而行。

本所相依式雙軸向振動台於民國 83 年底連同地震平台實驗室廠房建造安裝完成，84 年開始運作執行中小型機儀電核能組件之耐震測試。平台尺寸為 90 cm x 90 cm，為高於地面 2 m 之機構，測試件若高度超過 1.8 m，吊卸工作困難並有工安上的疑慮。故測試件尺寸超過平台限制的測試案，則租用國家地震工程研究中心 5 m x 5 m 之地震平台進行，惟測試時程須插入國震排定之測試空檔，較難掌握。且以相依雙軸向的平台運動來模擬實際三軸向運動的地震環境，其測試結果雖為規範允許，若有人質疑總要費心解釋，而且測試操作程序多出測試件需轉向之步驟，況且租用國震中心地震平台亦所費不貲。故隨著耐震測試技術成熟及現有地震平台老化之顧慮，購建新的三軸向振動台頗為需要。

設備組件耐震測試技術為研發工作或工業發展不可或缺之工具，尤其台灣地處頻繁地震帶，目前災變需用維生與通訊設備之耐震規範及研究國內亦有所不足，新的三軸向振動台對此非常必要。國震中心在仁德成大校區興建的 8 m x 8 m 振動台或可於明後年開始運作，擴大其在土木、橋梁結構之地震防災研究，相對於設備之耐震研究則國內僅有本所有較深入的技術經驗與人員，卻受限於測試設施之老舊。

目前規劃階段可說已完成，建議能儘早興建新的三軸向振動台，以保持與持續發展本所設備耐震測試關鍵技術能力，並培養設備耐震測試、耐震研究、結構地震安全研究之新人才。

(二)參訪 Servotest 公司除了確認規劃中三軸向振動台之性能規格外(參閱本報告 19 頁之表)，亦了解振動台設計建造上尚有一些設備選項攸關振動台達到其性能，以確保運轉上的穩定性。故建議參考目前規劃出的規格並加上以下之注意事項列為主要採購規範，其他可視未來經費與廠房空間限制予以酌加，主要目的在整體振動台設計上的協調性與運作上的穩定性及便於維修。其他注意事項如驅動器應選擇 double ended，因 single ended 活塞面積兩邊不對稱，啟動時易有抖動現象。另驅動器橫向自然頻率須大於 65Hz 避免運作時產生共振，以及不用頂桿(stinger)連結驅動器與 table(加頂桿需較大空間)。驅動器之油封應能減少漏油與對驅動桿之阻力並有洩油處理設計。驅動器與振動台連結應能平衡出力，避免小於 90°夾角。Table 應有自然頻率分析，確認遠大於振動台工作頻率範圍 60 Hz。採用固定式反力塊，避免浮動式氣囊劣化維修問題，固定式反力塊之設計對周圍環境振動影響應限制實驗室周圍 10 公尺距離小於 0.15 g 震度。

(三)建議參考英國作法，不以 65 歲為退休年齡。未來我國高齡及少子化對國家的影響將漸趨嚴重，因平均壽命增加，未來 65 歲之人員相信仍將維持有工作能力，參考英國作法如不限齡退休，不但資深人員經驗可繼續傳承，對少子化後未來就業市場之人力缺乏過渡時期亦有幫助。

附錄一 振動台照片、設計簡圖

附錄 項次	使用單位	平台尺寸	振動頻率	設計載重	加速度	速度	位移	自由度
	核能研究所(研擬規格)	3m x 3m	60 Hz	2 T	9 g	2.67 m/s	222 mm	6
1	印度 Bangalore, CPRI	3m x 3m	50 Hz	10 T	1 g	1 m/s	150 mm	6
15	印度 Kalpakkam, IGCAR	6m x 6m	60 Hz	100 T	1.5 g	1.2 m/s	150 mm	6
2	中國重慶交通科研設計院	3m x 6m, 3m x 6m	50 Hz	35 T	1 g	0.8 m/s	150 mm	6
3	中國福州大學	4m x 4m, 2.5m x 2.5 m	50 Hz	22 T, 10 T	1.5 g, 1.5 g	1.05 m/s, 1.5 m/s	250 mm, 250 mm	6
4	中國蘭州理工大學	4m x 4m	NA	15 T	4 g	1 m/s	250 mm	6
5	中國昆明理工大學	4m x 4m	NA	NA	NA	NA	NA	NA
6	中國廣州華南理工大學	4m x 4m	NA	20 T	1 g	NA	NA	3
7	中國山東建築大學	3m x 3m	NA	10 T	2 g	NA	125 mm	NA
8	中國長沙中南大學	4m x 4m 固定 4m x 4m, 4m x 4m 可移動	50 Hz NA, NA	30 T 30 T, 30 T	1.6 g NA, NA	1 m/s NA, NA	250 mm NA, NA	6
9	中國成都中國核動力研究設計院	6m x 6m	100 Hz	60 T	1 g	NA	150 mm	6
10	中國河北保定工信部電信研究所	2.5m x 2.5m	100 Hz	3 T	2 g	2.5 m/s	600 mm	6
11	中國哈爾濱中國地震局	5m x 5m, 3.5m x 3.5m	100 Hz	30 T, 6 T	2 g, 4 g	1.5 m/s, 2.5 m/s	500 mm, 250 mm	6
12	中國南京河海大學水下地震台	直徑 5.6m	100 Hz	30 T	2 g	1 m/s	150 mm	6
13	中國蘇州大學	6m x 8m	50 Hz	150 T	1.2 g	0.9 m/s	500 mm	6
14	中國上海發電設備成套設計研究院	2.5m x 2.5m	100 Hz	6 T	7 g	2.5 m/s	180 mm	6
16	中國成都理工大學	4m x 6m	100 Hz	40 T	1.6 g	1.5 m/s	300 mm	6

1. 印度 Bangalore, Central Power Research Institute, Earthquake Engineering Laboratory



Component Classification



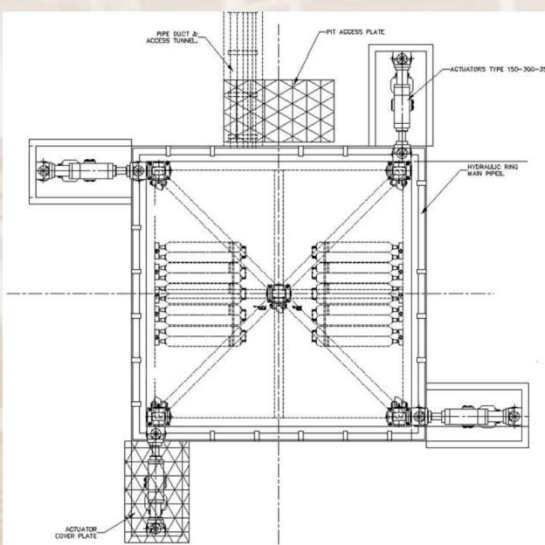
Courtesy of CPRI INDIA
3M X 3M TABLE



CRPI MAST LAYOUT

3Mx3M MAST LAYOUT AT
EXISTING LAB, AS A
STANDALONE SYTEM

RECENT UPGRADE OF ORIGINAL
SERVOTEST SEISMIC TABLE TO
PULSAR



SERVOTEST 3Mx3M MAST
AT CPRI INDIA

2. 中國 重慶交通科研設計院 地震模擬試驗台陣

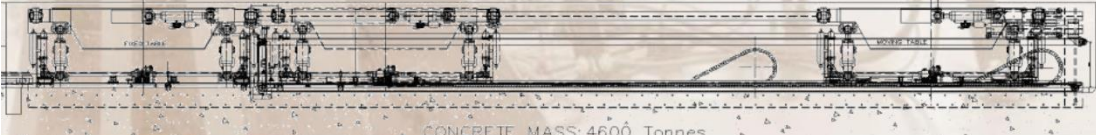
BRIDGE MODEL EARTHQUAKE SIMULATION

CCRDI CHONGQING

DEGREE OF FREEDOM 自由度	6
NUMBER OF TABLES 震動台數量	2
TABLE SIZE 每個台面尺寸	6M X 3M
SPECIMEN 載荷	35T 35吨/台
ACCELERATION X and Y X向Y向加速度	1.0G
ACCELERATION Z Z向加速度	1.0G
HYDRAULIC POWER 油源電力	1 Mega Watt
STROKE +/-150MM HORIZONTAL	




VERTICAL ACTUATORS TYPE:.....150-200-250
HORIZONTAL ACTUATORS TYPE:.....150-300-250



CONCRETE MASS: 4600 Tonnes

3. 中國 福州大學土木學院 三台陣地震模擬試驗系統



SERVOTEST BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS

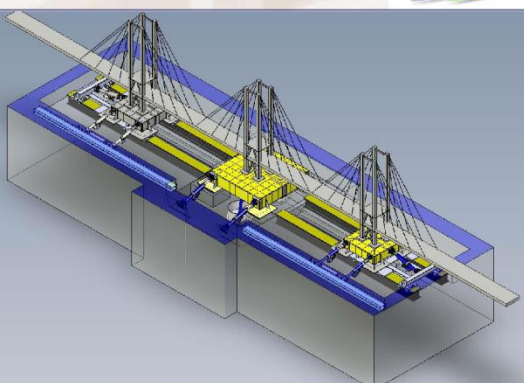


铁科院

Fuzhou University 福州大学土木学院的三台陣地震模拟试验系统

Final Acceptance - July 2011
Fuzhou University requested Quotation for 6
DOF table - September 2012 complete

DEGREE OF FREEDOM	3
NUMBER OF TABLES	3
TABLE SIZES	4M X 4M - 9650kg - fn 124Hz 2.5M X 2.5M - 2995kg - fn 220Hz
SPECIMEN	22T LARGE TABLE 10T SMALL TABLE
ACCELERATION X	1.5G with maximum payload
ACCELERATION Y	1.2G with maximum payload





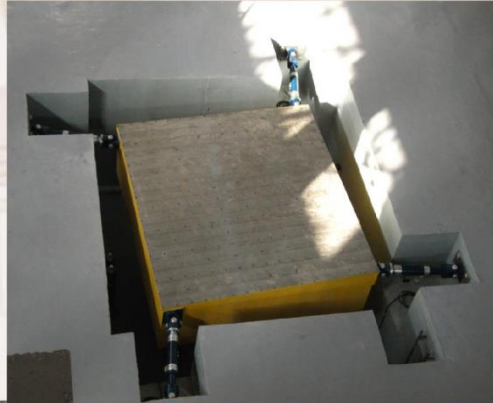
4. 中國 蘭州理工大學 地震模擬振動台

SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



Lanzhou University of Technology

Earthquake shake table 4m x 4m simulator
Shipped Jan 2009, installation in started 2012,
complete.



5. 中國 昆明理工大學 地震模擬振動台

SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



Kunming University

Earthquake shake table 4m x 4m simulator
Installation & commissioning finished by Feb 2013.
Accepted by July 2013



6. 中國 廣州 華南理工大學 地震模擬振動台 (驗收中)

SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



South China University

Earthquake shake table 4m x 4m simulator
Phase 1 & 2 combined for Installation, to be accepted



7. 中國 山東建築大學土木工程學院 地震模擬振動台

SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



Shandong Jiangsu university

Earthquake shake table 3m x 3m simulator
Acceptance June 14



8. 中國 長沙 中南大學土木工程學院多功能振動台實驗室

SERVOTEST BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



Central South University 中南大学 国家高铁建造
技术工程实验室

Multiple 4m x 4m Six degree of freedom shake table
Final Acceptance – Phase 1 (2 x Simulators) - July 2012
Order Phase 2 – 1 x Simulator – August 2012



DEGREE OF FREEDOM	6
NUMBER OF TABLES	4
TABLE SIZE	4M
SPECIMEN	30T each table
ACCELERATION X and Y	0.8G
ACCELERATION Z	1.6G
HYDRAULIC POWER	1.3 Mega Watt



9. 中國 成都 中國核動力研究設計院 地震台

SERVOTEST BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



The Nuclear Power Institute of China 中国核动力研究院6米X6米地震台

The Nuclear Power Institute of China (NPIC), set up in 1958, is the largest comprehensive base in China for nuclear reactor engineering research, design, testing and operation. NPIC chose Servotest to supply its 6m x 6m table for seismic simulation



10. 中國 河北保定 中國信息通信研究院 工信部電信研究所 中國泰爾實驗室

SERVOTEST BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS

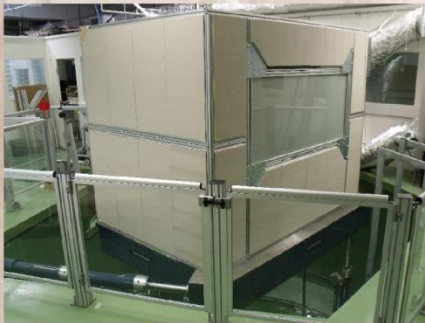


CATR

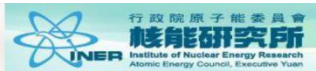
4M X 4M TABLE

Acceptance Jan 2015

Aluminium table to reduce weight

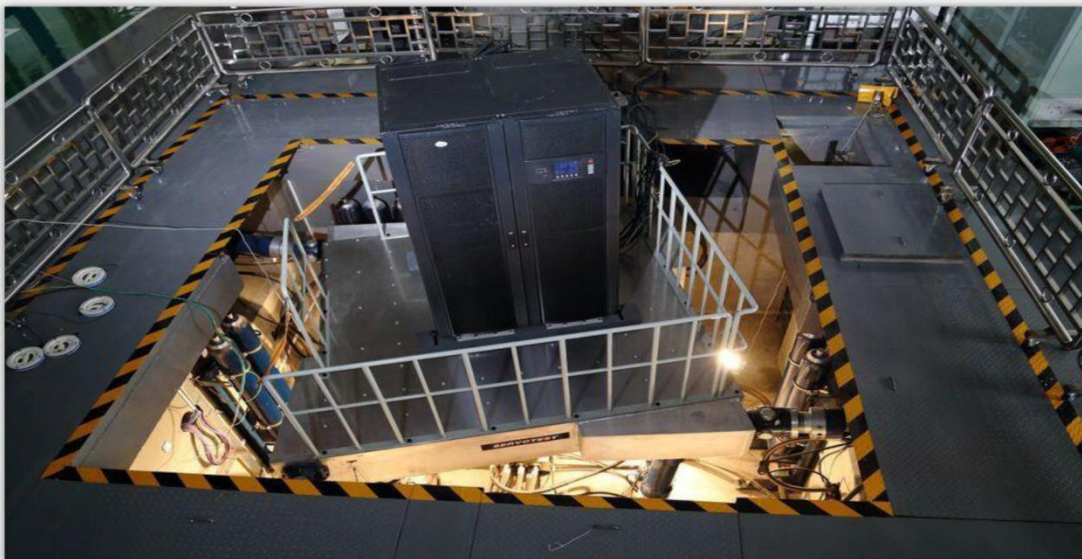


SERVOTEST BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



China Academy of Telephonic Research 工信部电信研究院

2.5m X 2.5m MAST
DOF: 6
Max Payload: 3 tons
Max stroke: X&Y ± 600 mm, Z ± 400 mm
Max acceleration :X&Y 2.0g, Z 1.8g
Max velocity :X&Y 2.5m/s, Z 1.8m/s
Operation frequency: 0.1~100Hz
Wave: Sine, random, earthquake



11. 中國 哈爾濱 中國地震局工程力學研究所地震工程與工程振動實驗室

SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



China Earthquake Administration
中国地震局工程力学研究所
地震工程与工程振动国家开放实验室

Dual Earthquake shake table simulator
In installation

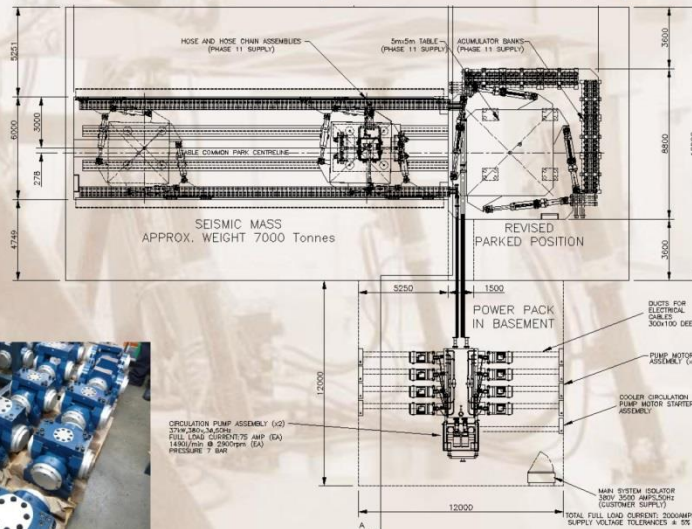


5m x 5m MAST

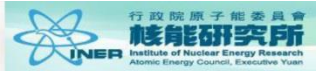
DOF: 6
Max Payload: 30 tons
Max overturning moment: 80 ton meter
Max stroke: X&Y ± 500 mm, Z ± 200 mm
Max acceleration: X&Y 2.0g, Z 1.5g
Max velocity: X&Y 1.5m/s, Z 1.2m/s
Operation frequency: 0.1~100Hz
Wave: Sine, random, earthquake

3.5m x 3.5m MAST

DOF: 6
Max Payload: 6 tons
Max overturning moment: 40 ton meter
Max stroke: X&Y ± 250 mm, Z ± 200 mm
Max acceleration: X&Y 4.0g, Z 3.0g
Max velocity: X&Y 2.5m/s, Z 1.8m/s
Operation frequency: 0.1~100Hz
Wave: Sine, random, earthquake



SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



China Earthquake Administration
中国地震局工程力学研究所
地震工程与工程振动国家开放实验室
Dual Earthquake shake table simulator

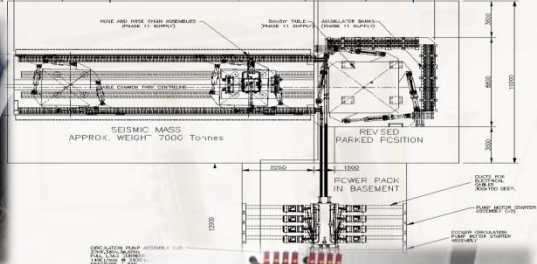


5m x 5m MAST

DOF: 6
Max Payload: 30 tons
Max overturning moment: 80 ton meter
Max stroke: X&Y ± 500 mm, Z ± 200 mm
Max acceleration: X&Y 2.0g, Z 1.5g
Max velocity: X&Y 1.5m/s, Z 1.2m/s
Operation frequency: 0.1~100Hz
Wave: Sine, random, earthquake

3.5m x 3.5m MAST

DOF: 6
Max Payload: 6 tons
Max overturning moment: 40 ton meter
Max stroke: X&Y ± 250 mm, Z ± 200 mm
Max acceleration: X&Y 4.0g, Z 3.0g
Max velocity: X&Y 2.5m/s, Z 1.8m/s
Operation frequency: 0.1~100Hz
Wave: Sine, random, earthquake



12. 中國 南京 河海大學結構抗震實驗室

SERVOTEST⁺BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



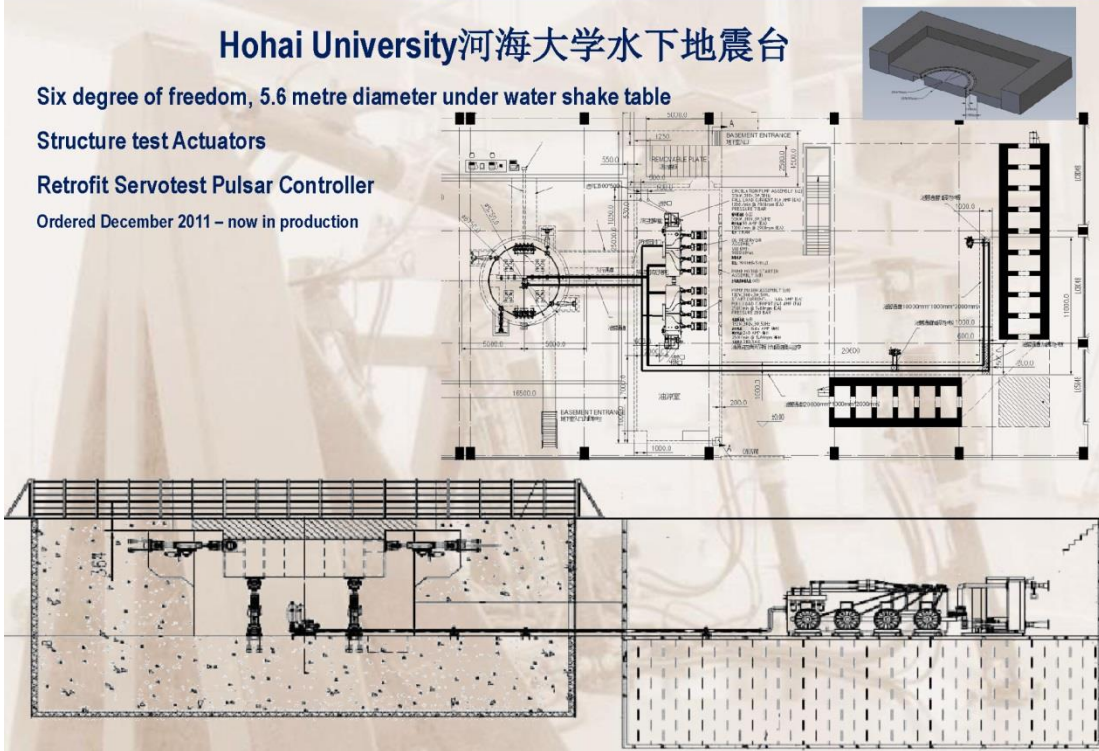
Hohai University 河海大學水下地震台

Six degree of freedom, 5.6 metre diameter under water shake table

Structure test Actuators

Retrofit Servotest Pulsar Controller

Ordered December 2011 – now in production



SERVOTEST⁺BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS

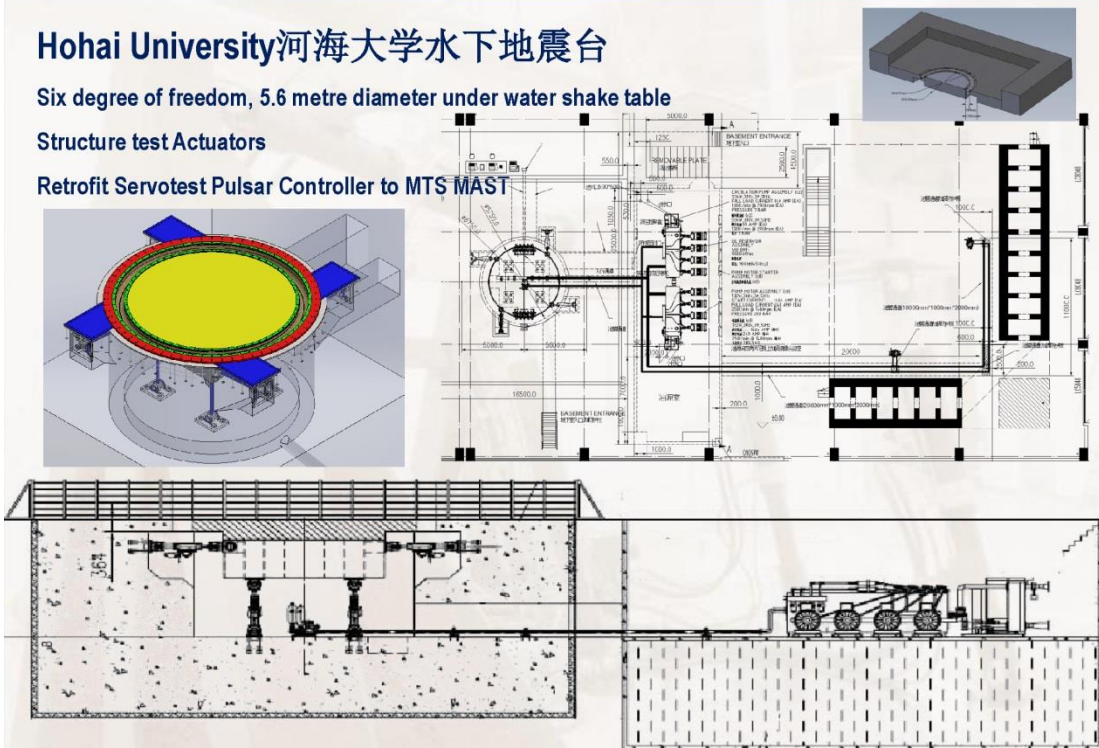
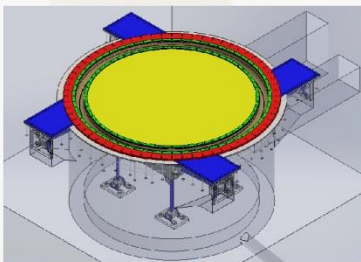


Hohai University 河海大學水下地震台

Six degree of freedom, 5.6 metre diameter under water shake table

Structure test Actuators

Retrofit Servotest Pulsar Controller to MTS MAST



13. 中國 蘇州大學 (研擬中)

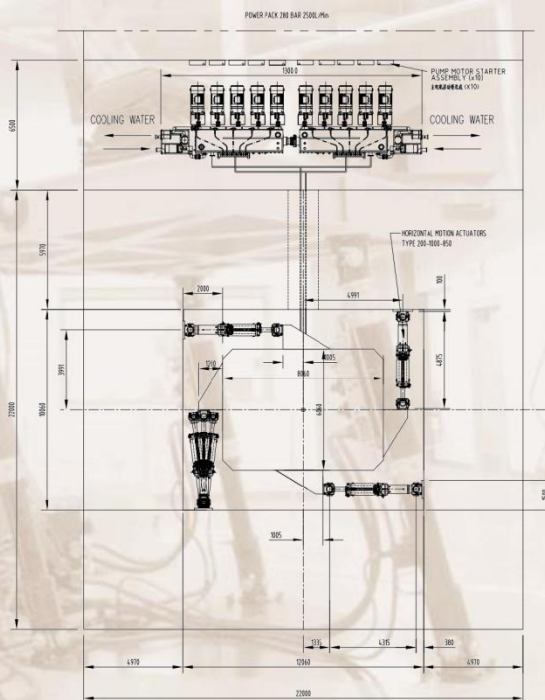
SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



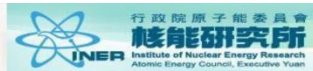
Suzhou University of Science & Technology

6m x 8m table awaits customer site

Table size	6 m X 8 m (min)
Degrees of freedom	6 degree of freedom
Pay load	150 t
Acceleration	: ± 1.2 g horizontal and ± 1.0 g vertical
Velocity	± 0.9 metre/sec – H, ± 0.9 metre/sec – V
Stroke	± 0.5 metre – H, ± 0.25 metre – V
Frequency range	: 0.1 Hz to 50 Hz
Input excitation	: Sine sweep, random, spectrum and time history
Hydraulic supply	1,500 kilo Watts



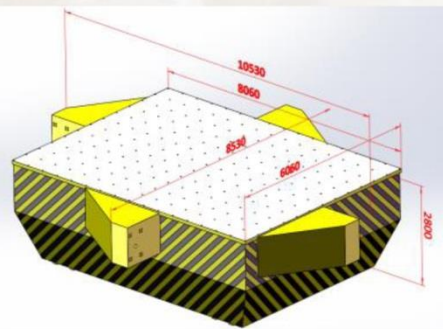
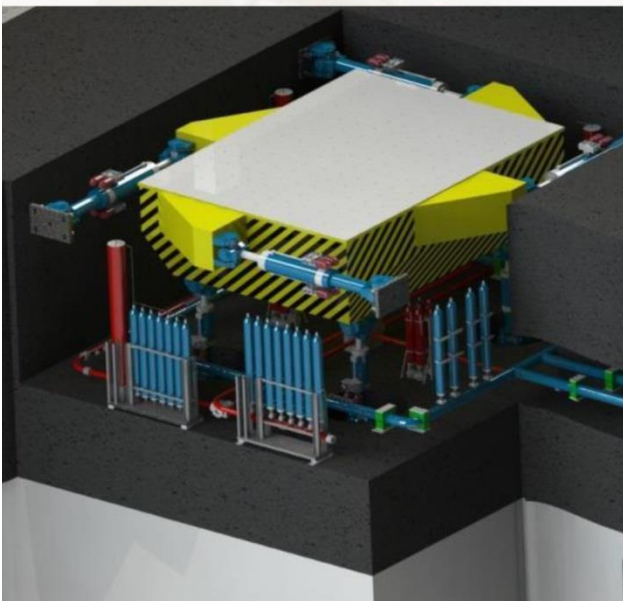
SERVOTEST⁺ BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS



Suzhou University of Science & Technology

苏州科技学院6米X8米地震台

Table size	6 m X 8 m
Degrees of freedom	6 degree of freedom
Pay load	150 t
Acceleration	± 1.2 g horizontal and ± 1.0 g vertical
Velocity	± 0.9 metre/sec – H, ± 0.9 metre/sec – V
Stroke	± 0.5 metre – H, ± 0.25 metre – V
Frequency range	0.1 Hz to 50 Hz



14. 中國 上海發電設備成套設計研究院（交付中）



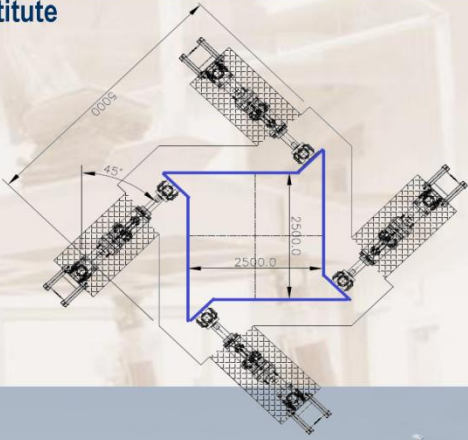
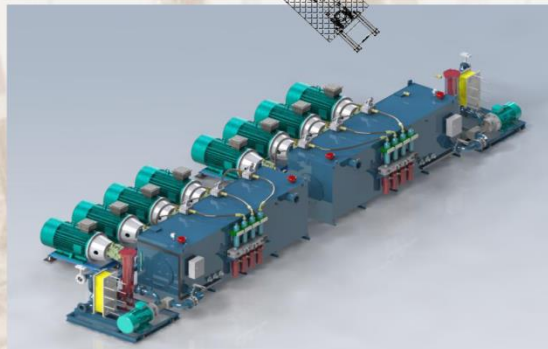
Shanghai Power Equipment Research Institute

2.5m X 2.5m MAST

Currently in commissioning



Table size	2.5 m X 2.5 m (min)
Degrees of freedom	6 degree of freedom
Pay load	6 t
Acceleration	: ± 7 g horizontal and ± 7 g vertical
Velocity	± 2.5 metre/sec – H, ± 1.5 metre/sec – V
Stroke	± 0.18 metre – H, ± 0.1 metre – V
Frequency range	: 0.1 Hz to 100 Hz
Input excitation history	: Sine sweep, random, spectrum and time
Hydraulic supply	1,500 kilo Watts





行政院原子能委員會
核能研究所
Institute of Nuclear Energy Research
Atomic Energy Council, Executive Yuan

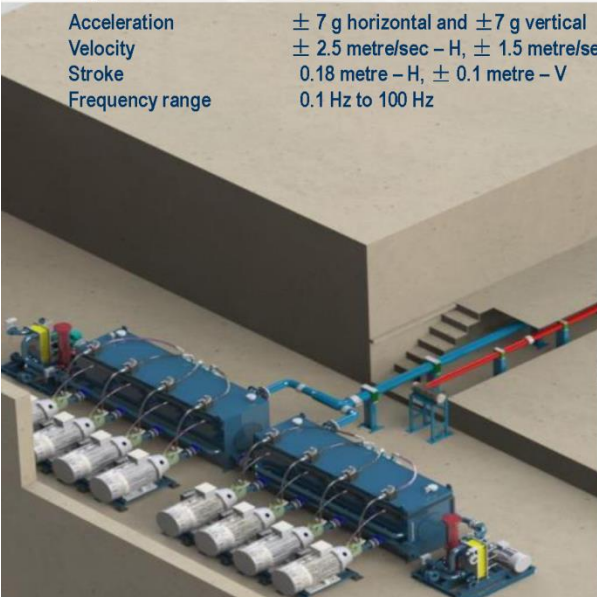
(SPERI) Shanghai Power Equipment Research Institute

Table size	2.5 m X 2.5 m (min)
Degrees of freedom	6 degree of freedom
Pay load	6 t
Acceleration	± 7 g horizontal and ± 7 g vertical
Velocity	± 2.5 metre/sec – H, ± 1.5 metre/sec – V
Stroke	0.18 metre – H, ± 0.1 metre – V
Frequency range	0.1 Hz to 100 Hz

2.5m X 2.5m MAST

国家核电上海成套院

2.5米X2.5米6自由度地震台




15. 印度 Kalpakkam, Indira Gandhi Centre for Atomic Research

SERVOTEST⁺BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS

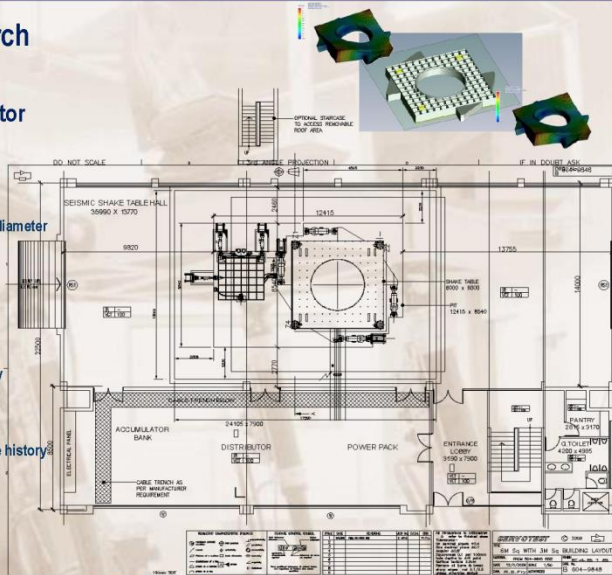


Indira Gandhi Centre of Atomic Research

6m x 6m Earthquake shake table simulator and
integration to existing Servotest 3m x 3m simulator

Acceptance : July 2015

Table size	6 m X 6 m (min) with central hole 3.5 m diameter
Degrees of freedom	6 degree of freedom
Payload	100 t
Acceleration	: ± 1.5 g horizontal and ± 1.0 g vertical
Velocity	± 1.2 metre/sec – H, ± 0.9 metre/sec - V
Frequency range	: 0.1 Hz to 50 Hz
Input excitation	: Sine sweep, random, spectrum and time history
Hydraulic supply	1,700 kilo Watts (3000 lpm)
Blow down system	5000 lpm



SERVOTEST⁺BBK
SERVOHYDRAULIC TEST & MOTION SIMULATION SYSTEMS

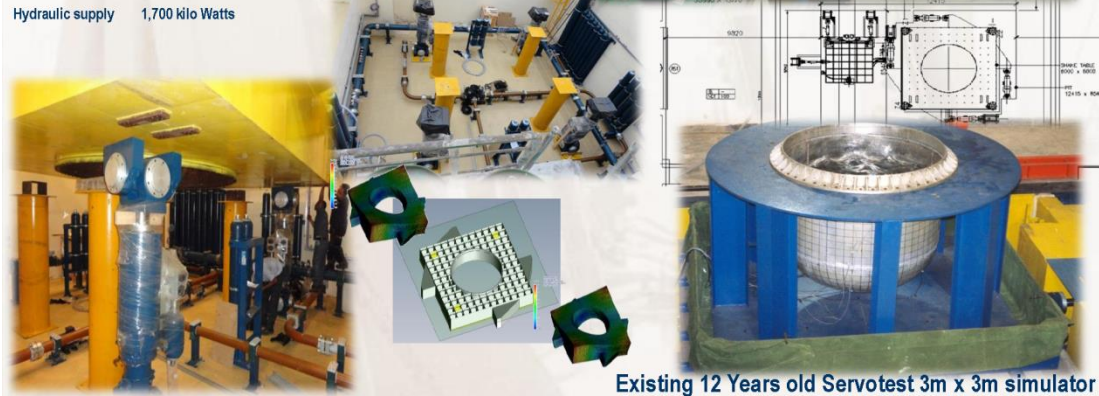
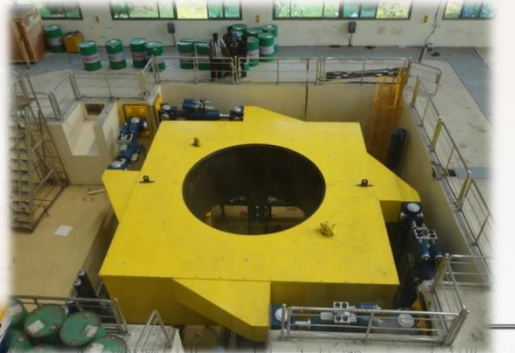


Indira Gandhi Centre of Atomic Research

印度英甘地原子能研究中心

6m x 6m Earthquake shake table simulator and
integration to existing Servotest 3m x 3m simulator

Table size	6 m X 6 m (min) with central hole 3.5 m diameter
Degrees of freedom	6 degree of freedom
Pay load	100 t
Acceleration	: ± 1.5 g horizontal and ± 1.0 g vertical
Velocity	± 1.2 metre/sec – H, ± 0.9 metre/sec - V
Frequency range	: 0.1 Hz to 50 Hz
Input excitation	: Sine sweep, random, spectrum and time history
Hydraulic supply	1,700 kilo Watts



Existing 12 Years old Servotest 3m x 3m simulator

16. 中國 成都理工大學 (執行中)

Chengdu University of Science & Technology

Table size	6 m X 4 m (min)
Degrees of freedom	6 degree of freedom
Pay load	40 T
Acceleration	: ± 1.6 g horizontal and ± 1.01 g vertical
Velocity	± 1.5 metre/sec – H, ± 1.3 metre/sec – V
Stroke	± 0.3 metre – H, ± 0.15 metre – V
Frequency range	: 0.1 Hz to 100 Hz
Input excitation	: Sine sweep, random, spectrum and time history
Hydraulic supply	2000 litre/min @ 280 Bar from 8 pump sets, 1,100 kilo Watts

