

出國報告（出國類別：其他）

## 赴韓國參加計算力學研討會報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：吳元傑 副研究員

王宜仁 助理研發師

派赴國家：韓國

出國期間：105年7月24日~105年7月29日

報告日期：105年8月23日



## 英文摘要

The 12<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics brings recent technical developments and case studies of numerical simulation in academic and industrial area together, including the innovation of numerical technique, skill of verification on numerical simulation, and long-term roadmap of numerical method. For the long-term trend, the key topic is the application of Multiscale Computational Engineering such as the presentations on applications of civil engineering, chemical engineering, biomedical engineering, and natural disaster. Therefore, it can be expected in the future that the application of multiple scale engineering will be widened and deepened, and also the need of hardware and software such as computer storage capacity and graphic demonstration capability will be increased.

Based on purpose of this trip, the topics of the conference about civil engineering, nature disaster, and nuclear engineering are focused, and the experience shares from worldwide researchers are valuable including the enhancement on earthquake, tsunami, and slope failure simulation, the simulation method on macro and micro structure behavior of structure, and the consequence demonstration of nature disaster. However, some legendary topics for computational mechanics like crack growth modeling are still paid attention by researchers from the amount of presentation in the conference. The application of crack growth for hydraulic fracking for shale gas, becomes a hot issue on computational mechanics field compared to others based on the quantity of presentation, and the conference provides good opportunities for attendee to share ideas and experience to build the robust model for industries.

Key Words: Numerical Simulation, Computational Mechanics

## 摘要

第十二屆世界計算力學研討會，彙整發表近年國際上產學界的數值模擬技術進展，包括數值分析方法的創新、試驗驗證技巧、以及數值方法的長期趨勢發展等方面。趨勢發展的關鍵議題則以多尺度計算工程(Multiscale computational engineering)的應用為主，包括土木、化工、生醫、自然災害等模擬，都有多尺度計算技術開發的案例，可見未來會進一步刺激Multiscale 計算技術的應用深度與廣度，連帶的電腦容量、圖形展示等硬體需求也將提升。

本次主要參與土木、自然災害、核能工程相關之技術簡報，獲得各國工作者的經驗分享，包括地震、海嘯、邊坡模擬技術改善經驗，以及針對結構物的巨觀與微觀模擬方法、災害影響的評估與展示。而對於計算力學長期關注的裂縫成長模擬技術研究，本次會議不少研究者仍持續對於金屬材料的裂縫、岩體裂隙成長模擬提出新方法；在應用方面的模擬，諸如由岩石裂縫成長而發展之水力壓裂法應用，較其他類的發表量來的高，除提供與會者共同討論解決產業界問題的機會，亦代表此應用目前相當蓬勃。

關鍵字：數值模擬、計算力學

# 目 錄

## 頁次

英文摘要 .....	i
摘 要 .....	ii
一、目 的 .....	1
二、過 程 .....	2
三、心 得 .....	29
四、建 議 事 項 .....	32

# 圖目錄

## 頁次

圖一 會議論文發表照片.....	3
圖二 由觀測、理論、計算模式，到達知識及進行預測的過程.....	4
圖三 結合 NMM 與 DDA 之砌石擋土牆邊坡地震穩定分析.....	5
圖四 SPH 法之邊坡穩定建模與參數敏感性分析.....	5
圖五 降雨引致邊坡滑動之試驗與數值分析.....	6
圖六 採大區域數值模式液化分析以增進預測之準確性.....	7
圖七 多尺度海嘯災情模擬架構.....	8
圖八 海嘯災情模擬之展示方法.....	9
圖九 大範圍海底斷層錯動隱地表變形分析.....	10
圖十 核子燃料護套模擬方式.....	11
圖十一 繞行管狀結構之模擬.....	12
圖十二 機翼受鳥擊模擬的程式與試驗比對.....	12
圖十三 輪胎與鋪面互制模擬方式及鋪面結構模擬.....	13
圖十四 輪胎與鋪面之摩擦係數建立方式及輪胎鋪面結構整體模式.....	13
圖十五 建築結構自然頻率分析與靜態非線性位移分析.....	14
圖十六 採用紅外線攝影紀錄地震測試過程.....	15
圖十七 家具之地震反應模擬與試驗結果比對.....	16
圖十八 橋柱有限元素建模及鋼筋混凝土之模擬.....	17
圖十九 橋柱混凝土破壞觀測與數值分析結果比較.....	17
圖二十 地震反應之試驗與分析結果比對.....	17
圖二十一 混凝土損壞參數與分析試驗結果.....	18
圖二十二 雙軸試驗邊界條件模擬與試驗結果比對.....	19
圖二十三 大火導致樓房倒塌分析.....	20
圖二十四 爆破導致樓房倒塌分析.....	20

圖二十五 地震導致樓房撞擊及倒塌分析.....	21
圖二十六 RBSM 離散數值法針對懸臂梁驗證 .....	22
圖二十七 RBSM 離散數值法針對混凝土柱驗證 .....	22
圖二十八 木材的力學特性測試與 FEM 模擬比對 .....	23
圖二十九 疲勞特性測試與 FEM 模擬比對 .....	24
圖三十 水力壓裂法採集頁岩氣之步驟.....	25
圖三十一 可壓裂性的評估要項.....	26
圖三十二 岩體裂隙受水力壓裂形成與擴展之模擬要項.....	26
圖三十三 岩體裂隙擴展之模擬改善方式.....	27
圖三十四 裂隙模擬之流固耦合建模方式.....	28
圖三十五 岩體裂隙數值模式與理論分析比對.....	28

# 一、目的

數值分析模擬為各項核能工程所需工作，除了依照規範進行設計工作外，更多的使用是針對結構系統組件受自然現象影響的探討，例如受熱、水、力、化作用下的反應行為，或是對海嘯、地震、土石流等自然災害的模擬，藉由數值分析內涵的理論，做為現象解釋的工具。數值模擬仰仗計算機的能力，隨著計算機能力持續增強，分析軟體更為人性化，提供更多的貼近真實物理化學等自然現象的模擬技術，以及更容易讓一般人理解的圖形展示，使人類以計算機來探索工程設施與自然現象的需求更加強烈。世界計算力學研討會是集合各類數值模擬的大型會議，除對目前新一代的數值模擬技術，提出未來趨勢發展的討論，在工程應用與自然科學研究，也涵蓋新的做法可供參考，因此本次藉此研討會在韓國首爾舉行之際參與，期能獲得相關技術發展資訊，以應後續研究發展所需。由於此會議議題廣泛，本屆共有超過 600 篇以上的論文發表，為使成效能聚焦，參與議題主要為土木結構設施的模擬技術，以及近期計算力學領域的研究趨勢之蒐集。前者並包括地震、海嘯或其他自然災害的工程需求與驗證模擬論文，區分為災害源模擬(例如：地震、海嘯、土石流)、設施動態行為模擬、災害評估模擬三方面。後者有關模擬技術本身的發展方面，包括多尺度計算工程(Multiscale computational engineering)：考慮由小到大的不同尺度模式分析；以及目前岩石力學領域的應用的裂隙問題模擬，與地下工程技術之開發。



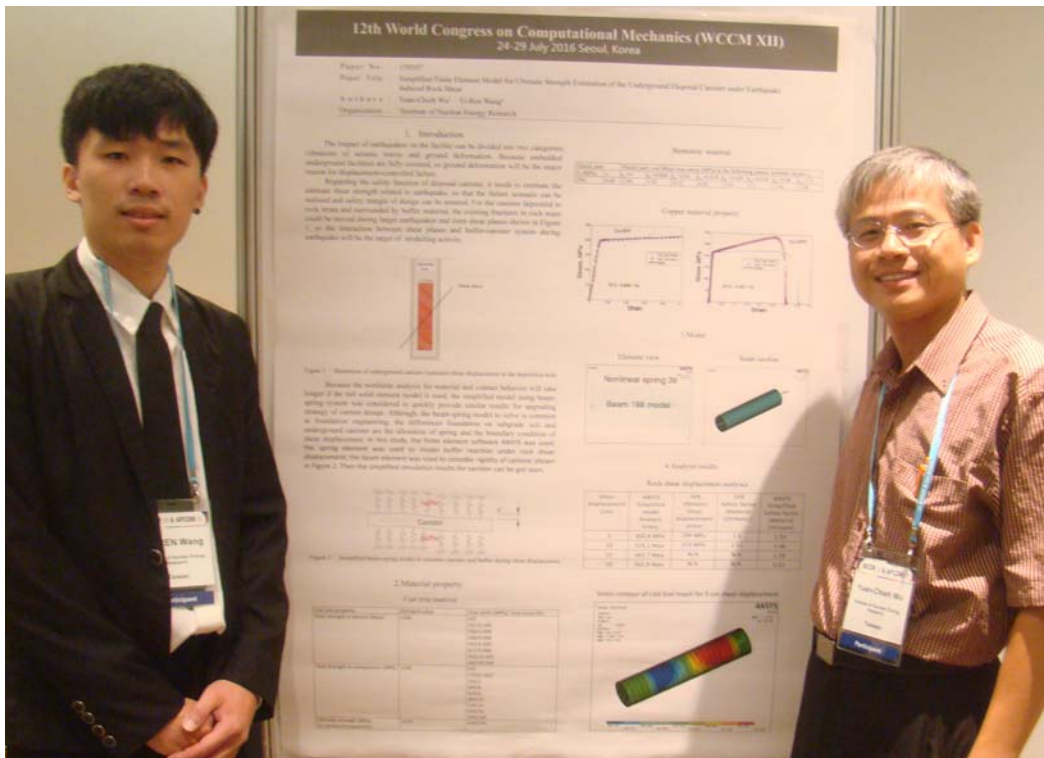
## 二、過 程

本次赴韓國首爾公差從 105 年 7 月 24 日到 7 月 29 日共計 6 天。此會議為 WCCM 與 APCOM(亞太計算力學研討會)一起合辦，會議的安排在上午開始時進行 Plenary lecture，主要講述計算力學趨勢發展，接著是依照各主題進行分組簡報會議。下午則先進行各專業的發展 Semi-Plenary lecture，再進行各主題分組會議。分組簡報大致看了解計算力學長期針對幾個題目，以不同的模擬技術進行討論、再擴展到實務應用，例如破壞力學、岩石裂隙變化、邊坡穩定、混凝土力學、金屬成型模擬，這些題目大體上都需考慮網格建立、收斂性、數值模式驗證等問題。而此次會議較特別的主題是生物醫學方面的計算力學應用，討論對象包括細胞、組織的模擬，對我們長期進行工程設施分析者而言，著實耳目一新，也代表即使工具使用相似，但數值模擬是一項專業的工作，並非只是隨意地套用參數，而是要對模擬對象的行為有深入研究，才能使工具應用得當，獲得與自然現象接近的結果，做出合理解釋及合適的預測。

本次公差之行程及工作日誌如表 1 所示，在會議中發表論文，如圖一，並與來自其他國家計算力學的研究人員討論主題內容與心得，增加了我們對未來工作的構想，也了解電腦科技日新月異。而計算力學的模式與方法推陳出新，如果不積極面對國際上的趨勢，學習新知、嘗試新方法，並且用心鑽研以提升自我，則故步自封的結果，相對於國際上的發展，絕對會讓自己掉入落後的局面，因此，參加此種國際大型會議，廣泛吸收科技進展，是持續研究工作相當有必要的再學習。本次對目前本所技術發展較重要研討會內容，在以下過程說明中分項敘述。

表 1 韓國公差行程及工作日誌

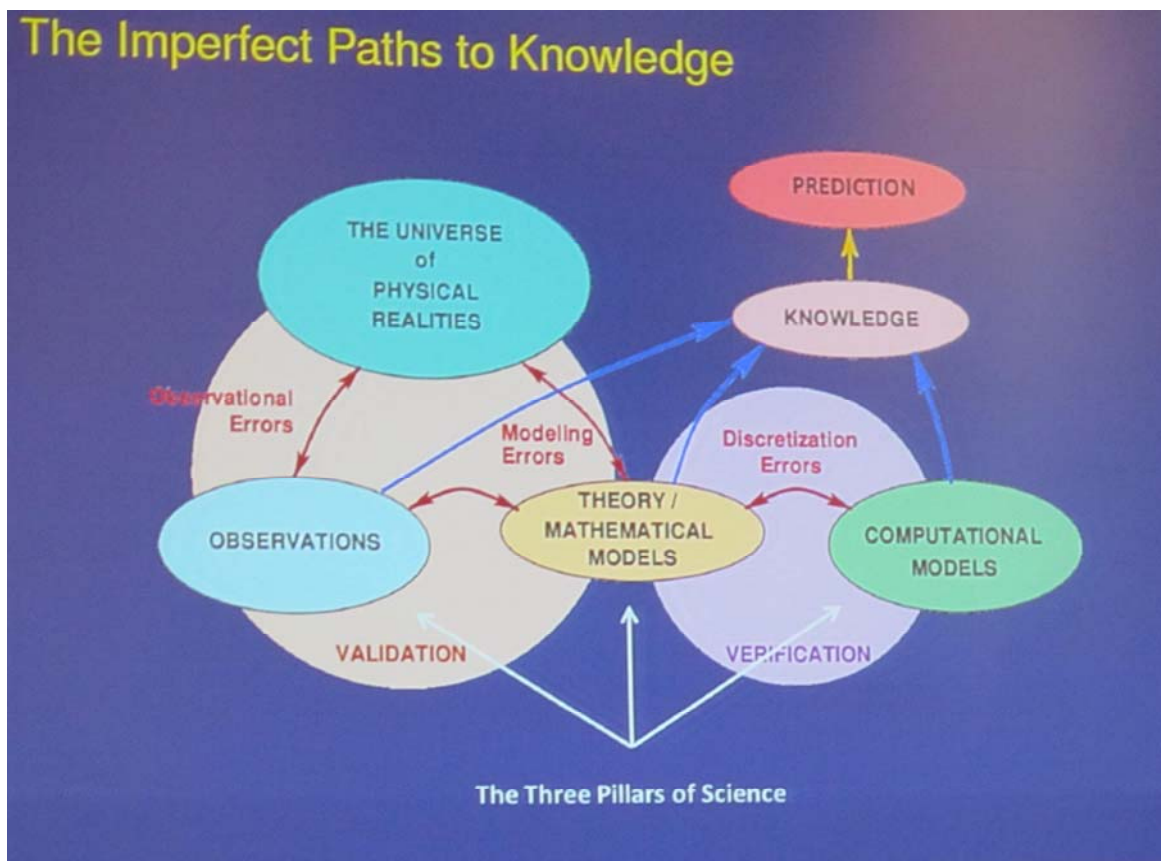
日期	行程	公差地點	工作內容
105.7.24 (日)	台北→韓國首爾市	首爾市	去程
105.7.25 (一) ~ 105.7.29 (五)	韓國首爾市→台北	首爾市	參與 12th WCCM 國際研討會 回程



圖一 會議論文發表照片

### (一) 計算科學的基礎與預測模式驗證

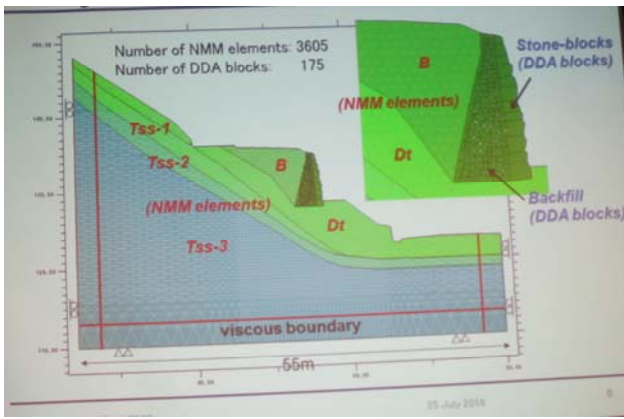
Tinsley Oden 在 Plenary lecture 演講「Foundations of predictive computational science: selection and validation of predictive models of complex systems」，對於參與整個計算力學用於預測工作上的人員，提供的專業領域應有的認識。他提出的論點：計算力學這項工作的目標，是表達對於預測計算科學的數學、統計、與哲學基礎的考量，這些科學是在具有不確定性的條件下，須對物理事件的數學與計算模式考量其預測性。而科學預測是基於科學原則對於未來事件的預測；科學方法則是需要基於觀測(或是試驗)、理論、與計算模擬而系統性地獲得知識。因此科學的三大支柱：觀測、理論/數學模式、計算模式，此三者均有不完美之處，均有其誤差，但均應重視、並且交互比較，如圖二。例如：模式和觀測需做 Validation、計算模式和理論間須做 Verification，三者形成的知識提供做為預測所需。圖中的 Validation 與 Verification 為目前工作上常須面對的問題，對其定義很容易混淆，此圖的說明非常具體且易於了解。



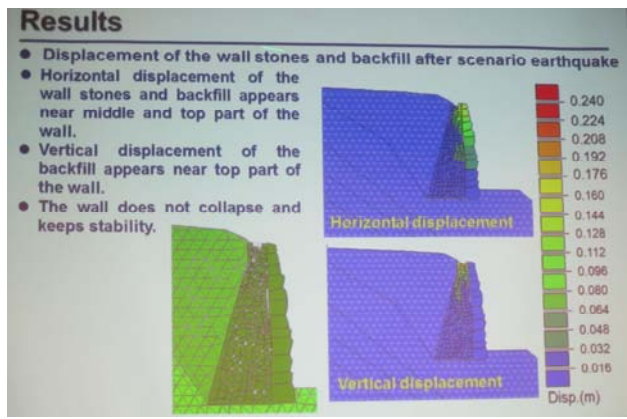
圖二 由觀測、理論、計算模式，到達知識及進行預測的過程

## (二) 邊坡穩定與土壤液化分析

1. S. Miki 等人發表的「Seismic stability assessment for the stone-blocks retaining wall by NMM-DDA」，採用不連續體元素，進行地震時的穩定分析。對象如日本的古城牆與石砌擋土牆的地震分析，考慮位於邊坡上的塊體本身力學特性，與邊坡材料異質性 (heterogeneity)，結合非連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)與數值流形法(Numerical Manifold Method, NMM)，並且輸入水平向 PGA 為 0.5g、垂直向 PGA 為 0.2g 的地震加速度歷時，進行動態分析，模型與分析結果如圖三，此方法相較於連體分析模式，更適合解釋與預測此種結構元件的受震行為。



(a) 模型建立

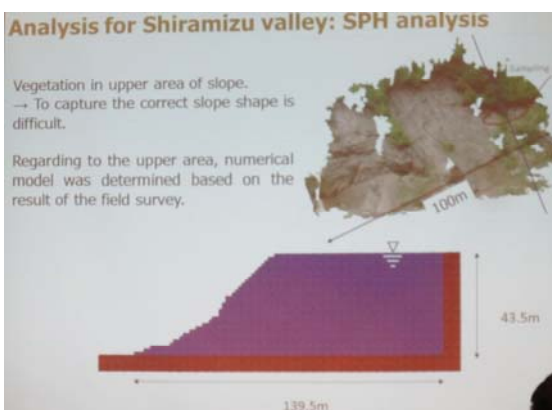


(b) 分析結果

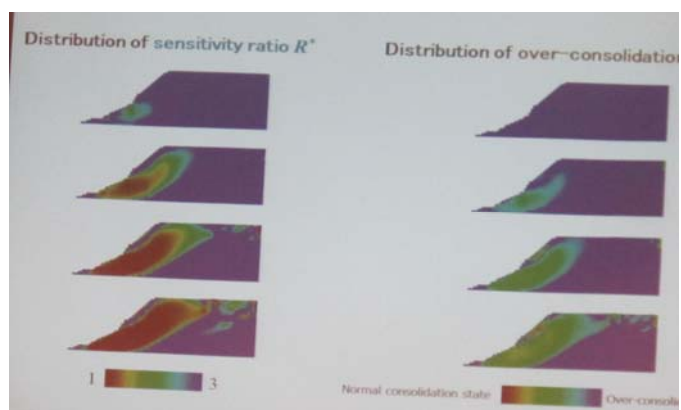
圖三 結合 NMM 與 DDA 之砌石擋土牆邊坡地震穩定分析

2. H. Nonoyama 等人發表的「SPH-slope stability analysis with DEM and 3D-Geometry

Modeling from Multiple Images」, 採用 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)方法, 此方法最早是開發用於模擬流體的流動, 以流體顆粒的角度進行模擬, 是一種無須網格 (Meshfree)的技術。由於可以用來處理大變形問題, 也被用於金屬成型、裂縫成長、斷裂、衝擊等問題。此篇論文針對日本 Shiramizu 山谷進行分析, 依據現地地形量測建立邊坡穩定的模式, 以參數機率模型的方式, 研究土壤在不同過壓密比(Over-consolidation), 邊坡的滑動影響範圍, 如圖四。



(a) 模型建立

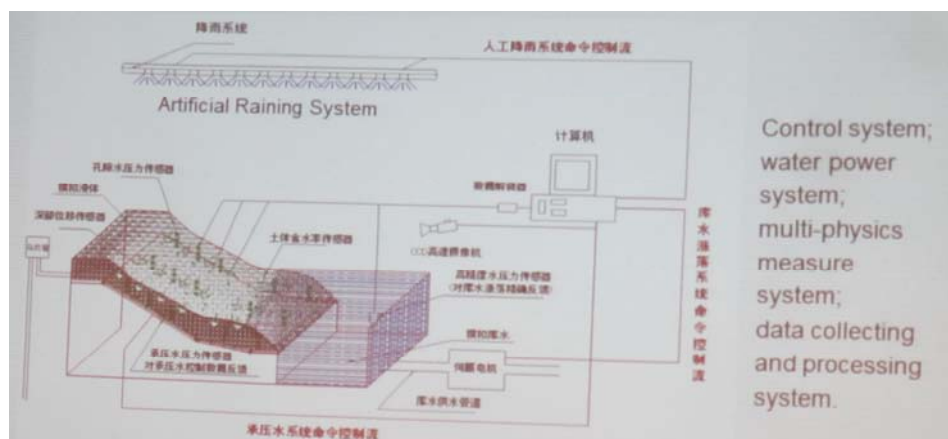


(b) 分析結果

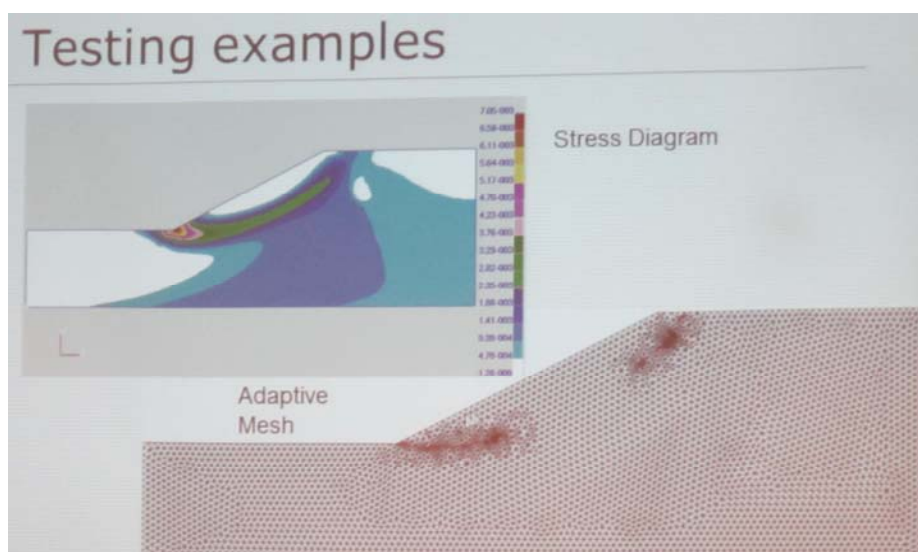
圖四 SPH 法之邊坡穩定建模與參數敏感性分析



3. S. Sun 等人發表的「Feasible line for prediction of the starting point of landslide」，探討邊坡受降雨產生滑動過程，開始滑動位置的預測模式。此研究採用傳統有限元素方法，假設土壤屬於彈-塑性的連體、具有軟化特性、及適於小變形分析，為了確認參數正確性，建立降雨與土石流關係的試驗平台，在程式設計上使用適應性網格(adaptive mesh)，使得分析過程能趨近試驗結果，如圖五。



(a) 降雨引致邊坡滑動之試驗平台

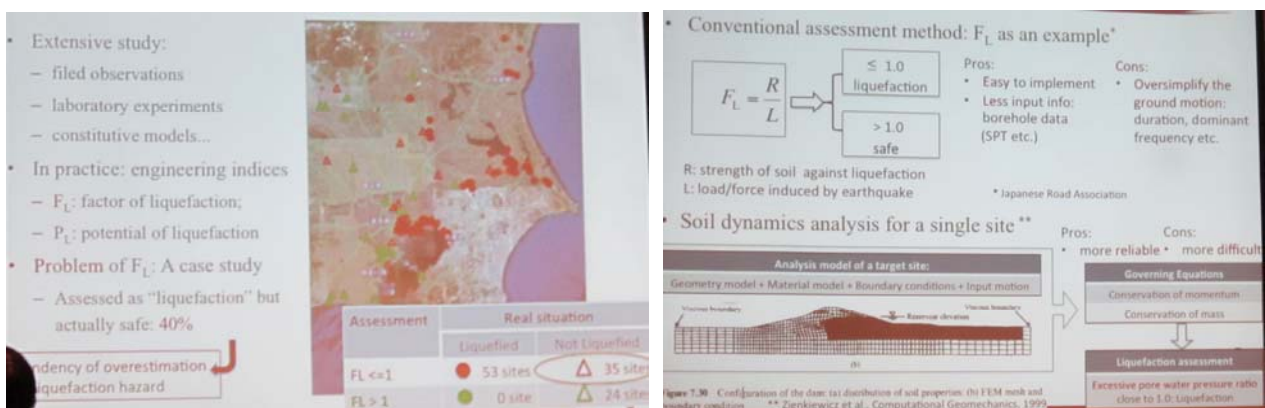


(b) 數值模擬之網格設計與應力分析結果

圖五 降雨引致邊坡滑動之試驗與數值分析

4. J. Chen 等人發表「High performance computing for assessing hazard of earthquake induced liquefaction in urban regions」，使用位於日本神戶 RIKEN Advanced Institute for Computational Science 的 K computer，執行大範圍的液化分析，該電腦是目前世界上性能

前五名的計算機。由於目前的做法是單個場址液化分析，建立液化潛勢圖，此圖在實際地震的觀測結果比較會較保守，評估為液化的場址，實際地震發生的統計，有 40%原評定會發生液化的地區，仍屬安全沒有液化發生(如圖六)，故期望由大範圍的液化分析，使預測能趨近實際觀測。場址土壤動力分析評估液化需進行超額孔隙水壓的計算，其模式採用二維有限元素土水模式，即 DACSAR 模式(Deformation analysis considering stress anisotropy and reorientation)，建立自動化的評估程式，借助高性能電腦的快速及效率，完成超過 1 萬個場址的計算。



(a) 觀測與單孔預測之差異

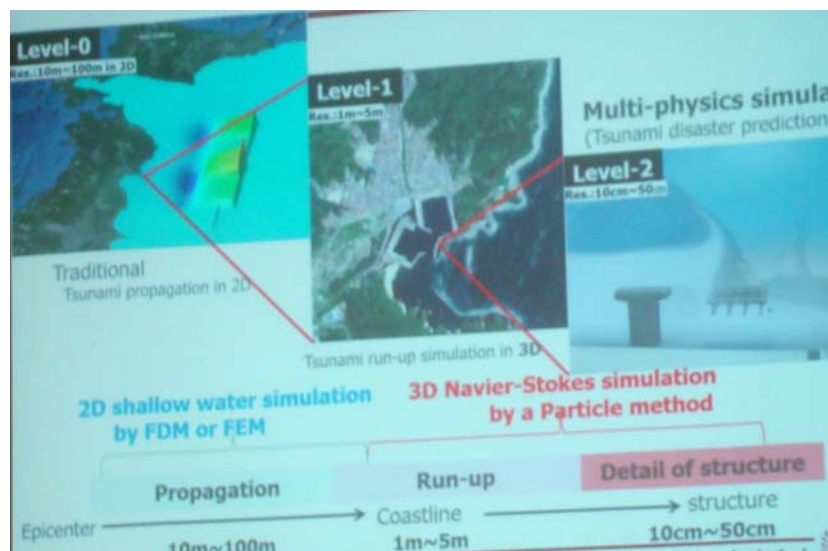
(b) 建模與分析流程

圖六 採大區域數值模式液化分析以增進預測之準確性

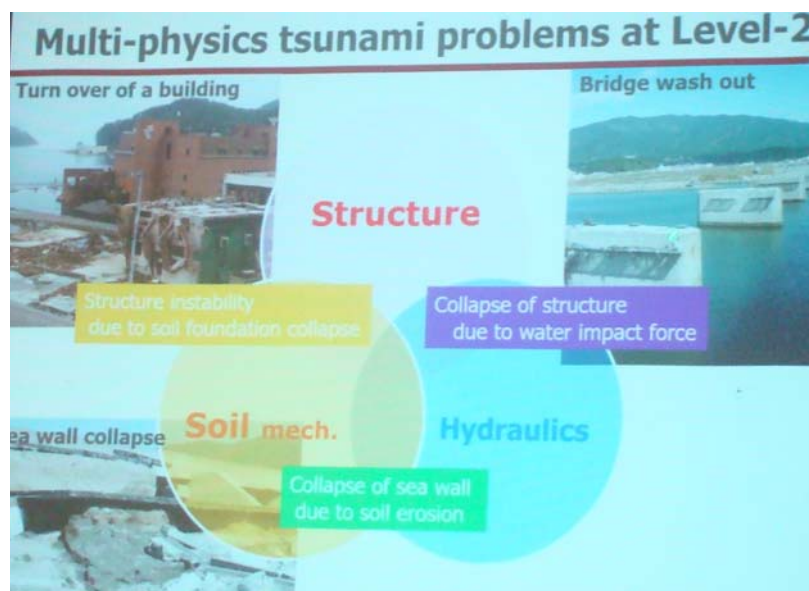
### (三) 海嘯災情模擬

1. M. Asai 等人發表「Multi-scale tsunami simulation for simulating bridge washout disaster by using a particle method」，考慮海嘯模擬的多尺度分析，由大範圍到小範圍，分 Level-0、Level-1、Level-2 三部分，分別為二維的線性水波分析解海洋的波傳，解析度 10~100 m；三維的近岸上溯分析，解析度 1~5 m；上溯過程橋梁受水流衝擊的分析，解析度達 10~50 cm，考慮多重物理耦合，採用顆粒力學(SPH)的方法，並且將各尺度的結果以動畫方式呈現(如圖七)。對於 Level-2 的模擬，多重物理則考慮了建築物受衝擊而翻倒(Turn over)、海堤受衝擊崩塌(Collapse)、以及橋樑的橋面被沖離(Wash out)的幾何大變形現象，結構模式須結合土壤力學與水力分析，如圖七所示。實際的案例以日本高知市為對象，模擬南海海槽地震產生的海嘯，模擬資料須整合為動畫顯示，整合的方式如圖八，第一步建立

GIS 的屬性與地形資料，第二步是建立三維繪圖的建築物，第三步是顆粒分析結果，第四步是結合海嘯分析結果。目前的展示能力已可將建築物與車輛細緻呈現，並且海嘯在街道上的進出、以及車輛受到衝擊後的移動也可隨時間展示，能夠使決策人員及一般民眾易於了解，對於災害的評估與準備的決策，可提供良好的資訊。



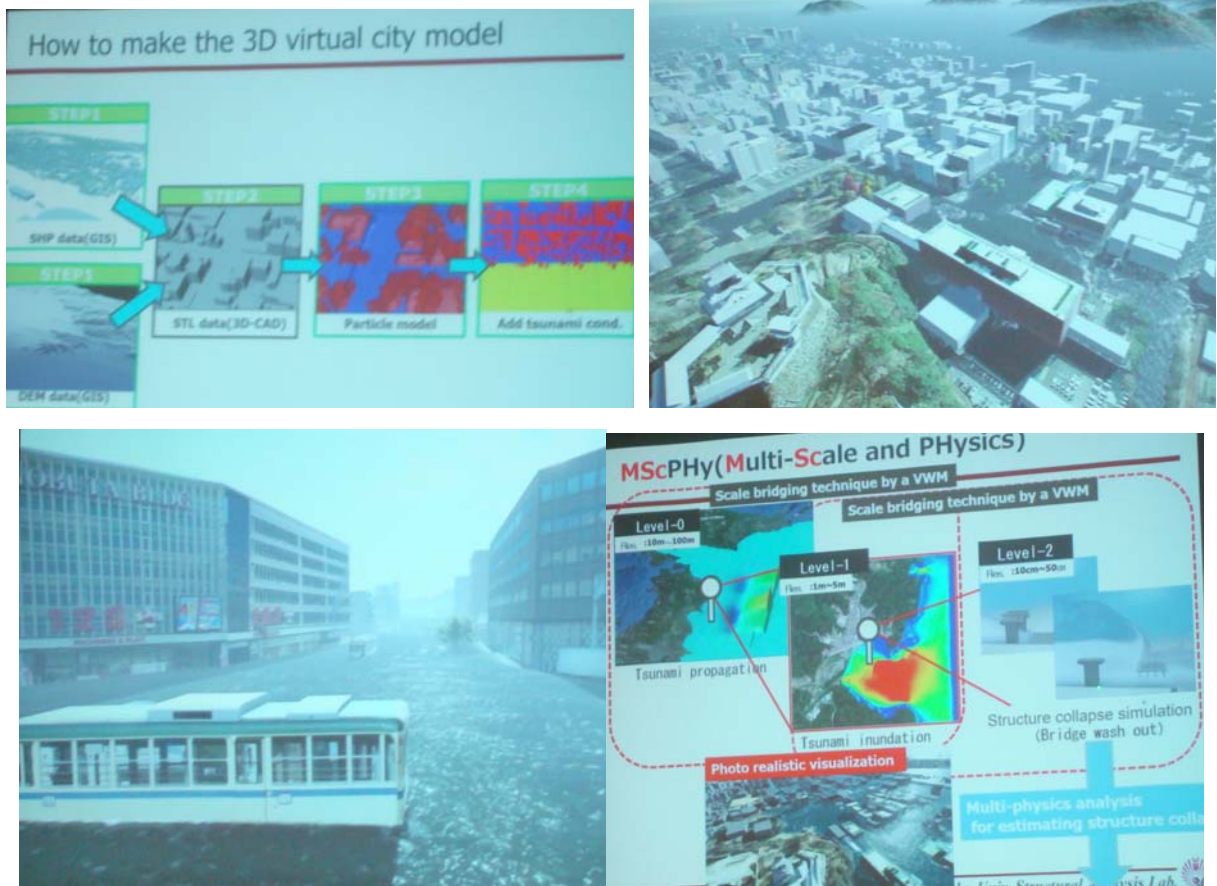
(a) 多尺度模式設定



(b) 模擬涵蓋學門

圖七 多尺度海嘯災情模擬架構

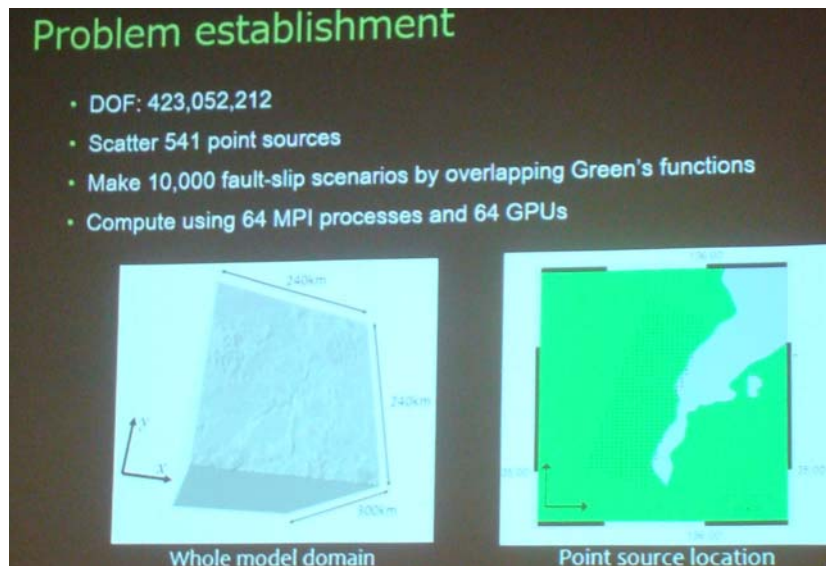




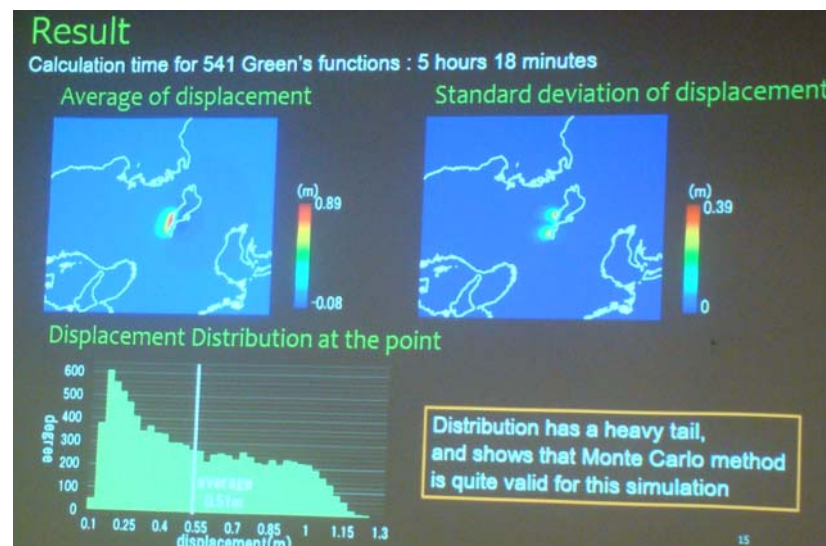
圖八 海嘯災情模擬之展示方法

2. Takuma Yamaguchi 發表「Crustal deformation analysis using heterogeneous computing」，海嘯的發生是因為斷層錯動引致海底地表變形，快速抬升水位而形成波浪，由於引起海嘯的地震規模至少 7 以上，斷層錯動長度往往超過 100 公里，對地形變化的計算在目前的電腦能力上是一項挑戰。而現在的海嘯預警需依賴建立各種可能的海嘯情節，因此須對大範圍的海底地形變化模擬，須執行多種震源設定，早期是使用點震源的方式，但目前則須改為斷層面滑動的模擬，因此，在電腦的模擬與計算執行，需有更新的做法。如圖九，此研究整個地形的建置共有四億兩千三百萬個自由度，設定五百多個地震位置以考慮其不確定性，採用了一萬個斷層滑移的可能情節，硬體上使用 64 個 MPI 程序與 64 個 GPU。執行結果，在 5 小時 18 分鐘可算完 541 個格林函數，並且採用蒙地卡羅方式進行位移分布統計。





(a) 模式建立



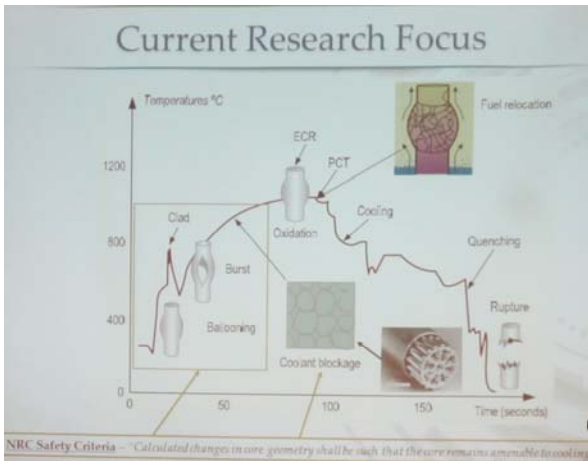
(b) 分析結果

圖九 大範圍海底斷層錯動隱地表變形分析

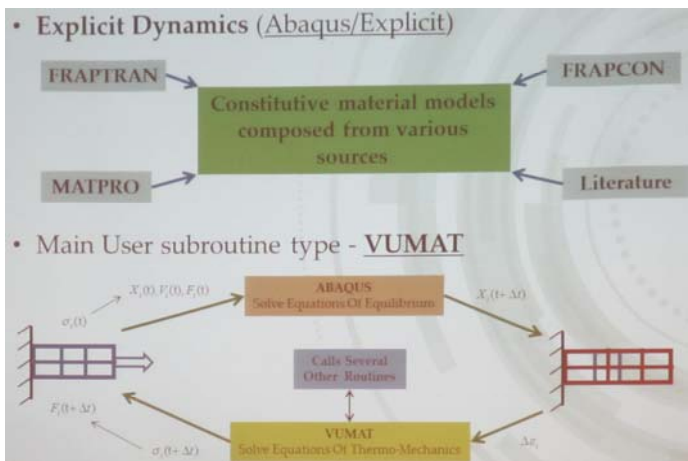
#### (四) 核能組件數值模擬

1. E. Landau 等人發表「A user-material routine for the visco-plastic ballooning and burst of Zircalloy nuclear fuel cladding in a loss of coolant accident」，針對核子燃料的護套在喪失冷卻水事件，會產生膨脹與爆裂的行為，進行模擬分析。核子燃料的熔毀過程如圖十所示，在 50 秒的短時間內溫度從三百多度上升至一千度，形成非線性、大變形的膨脹與爆裂現象，要達到準確模擬，基本上需有正確的材料模式；而從設計的角度，NRC 的規定是計算出來的燃料核心幾何改變量，需使核心仍舊可以冷卻，因此，計算的準確性是審查的

重點。此篇模擬的工具採用商用程式，進行顯示(Explicit)分析，並以自行撰寫的副程式 subroutine，輸入材料模式，包含粘塑性變形關係、及潛變率之變形關係。V&V 程序包含 Single/Multiple element test、Study of mass scaling effect、Mesh refinement study (time and space mesh convergence)、Modeling of comparable benchmark experiment。



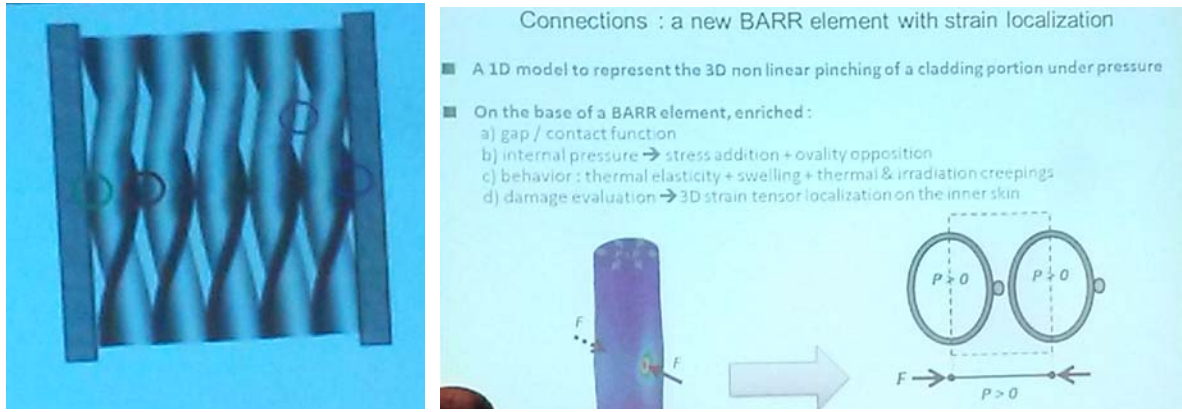
(a) 燃料束熔毀研究範圍



(b) 數值模擬方法

圖十 核子燃料護套模擬方式

2. B. Leturo 等人發表「A new structural behavior to perform efficient nonlinear SFR fuel bundle thermomechanical analysis」，研究對象為法國的反應器 Phenix Sodium Fast Reactor 之新燃料束設計，此種燃料束為六角形盒子，採用 217 條繞行的不鏽鋼管(Wire-wrapped rod)來固定燃料，以及有 217 個 Pin；材料行為則有膨脹、輻射潛變(Irradiation creeping)、熱潛變(Thermal creeping)，如果要完整的模擬，所需錐狀元素須達到 100 億個，因此結構分析的建模需考慮採用特殊的技巧。他們考慮不同尺度的模式，對於大尺度模式採用六角形管狀，Pin 接觸則以桿狀元素段端和外管做接觸行為來模擬，而新開發的桿狀元素，設定多種功能，如圖十一。



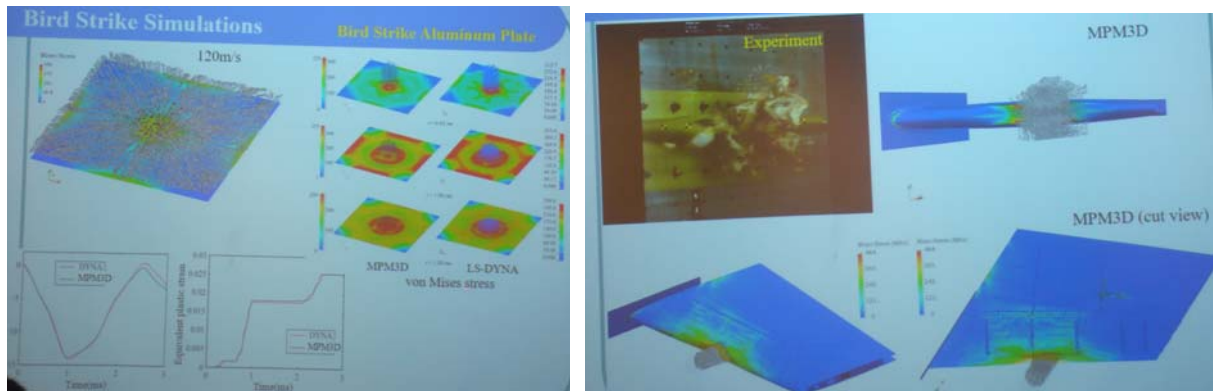
(a) 結構物幾何形貌

(b) 數值模擬方法

圖十一 繞行管狀結構之模擬

### (五) 適應性(Adaptive)元素模擬

1. B.Wu 等人發表「Adaptive shell-material point method for bird strike simulation」，此方面的議題主要是高度非線性、且為動態問題。飛機受鳥擊的模擬具有高速度(100~300m/s)、短時間的載重，需考慮鳥類的應力模擬、及流體結構互制效應，並且須結合測試結果。此研究採用材料質點法(Material point method, MPM)進行模擬，分析模式與 LSDN 進行比對，以及與實驗結果比對，如圖十二，證明其正確性。



(a) 數值模擬方法比對

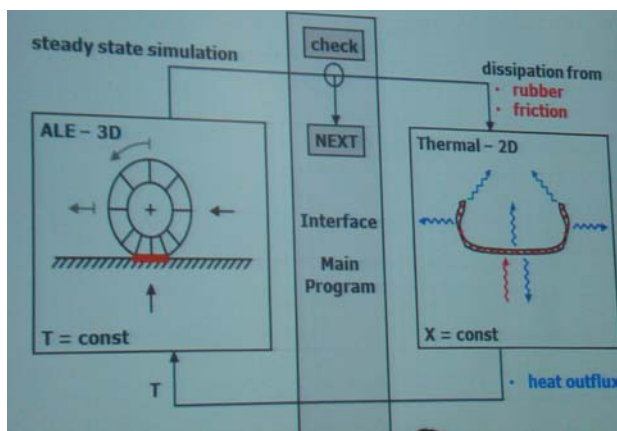
(b) 數值模擬與試驗結果比對

圖十二 機翼受鳥擊模擬的程式與試驗比對

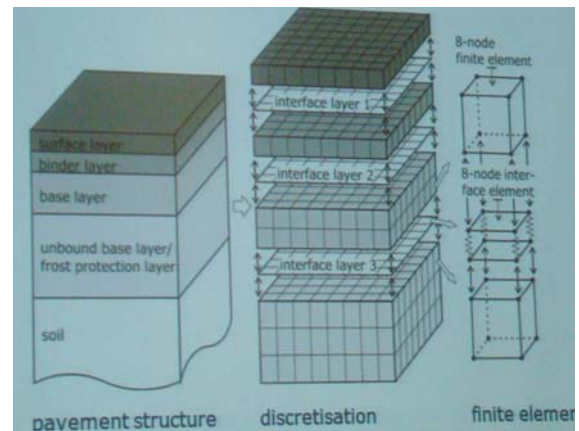
2. M. Kaliske 發表「Tire-pavement-interaction material modelling, adapted FE-formulation, polymorphic uncertainties」，針對輪胎的模擬技術進行討論，互制行為包括輪胎變形、地



面摩擦力、鋪面材料特性、鋪面長期的耐久性之影響，模擬的架構如圖十二，採用 ALE 模擬輪胎的行進，此模組須能計算消能方式，故輪胎在圓形轉動測試架的穩態轉動測試，分析溫度場與應力場。鋪面瀝青混凝土是屬於異質材料，採用 Zopf 等人(2015)溫度相關的黏彈塑性模式進行模擬，並由三軸反覆載重試驗獲得參數；整體鋪面結構的模式如圖十三。路面的摩擦力係數考慮滑動速率、接觸壓力與溫度，對於接觸表面特性，進行高解析度之量測，摩擦係數與既有模式及有線元素分析結果亦進行比較；在分別完成輪胎與接觸面模擬、鋪面的熱力模式，再將兩模式加以耦合，建立整體模式，如圖十四。

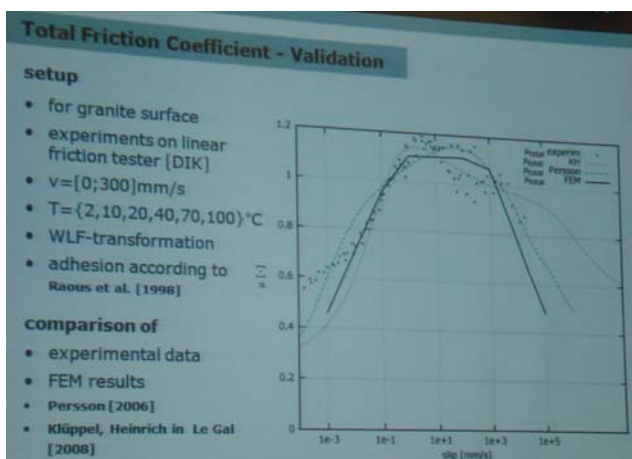


(a) 輪胎運動之模擬

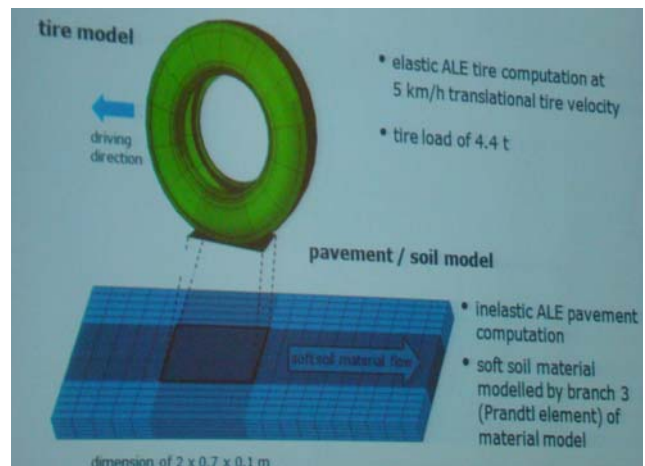


(b) 鋪面結構之模擬

圖十三 輪胎與鋪面互制模擬方式及鋪面結構模擬



(a) 輪胎摩擦行為之模擬



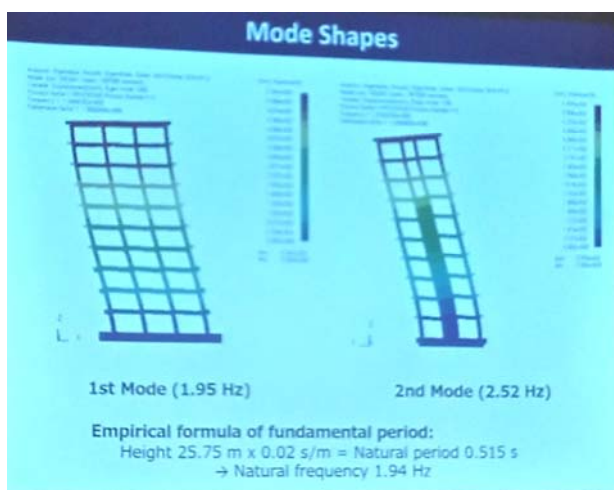
(b) 輪胎與鋪面互至行為之模擬

圖十四 輪胎與鋪面之摩擦係數建立方式及輪胎鋪面結構整體模式

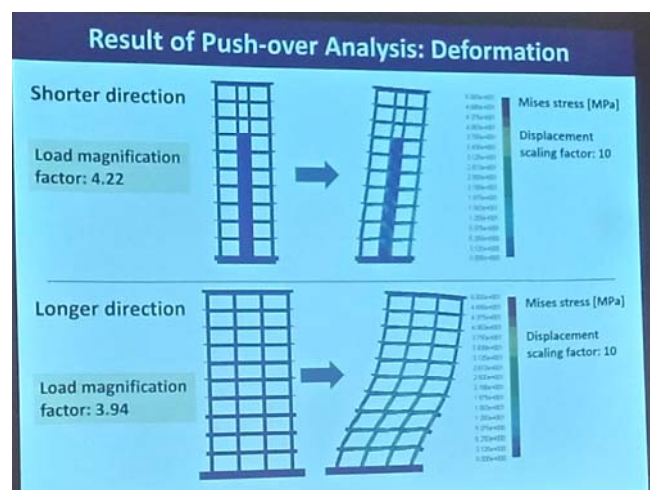
## (六) 建築結構之材料模擬與地震分析

1. T. Yamashita 等人發表「Seismic response analysis of a medium-rise reinforced concrete building using a detailed finite element model」，為日本國家研究所地球科學與防災所之研究，利用有限元素數值模擬軟體重現民生建築物於大地震下的破壞過程，透過三維的實體元素模擬鋼筋混凝土，並建立一個中高樓層鋼筋混凝土建築物，以橫向設置剪力牆的構架做為研究案例。於有限元素建模模擬方面，利用實體元素進行模擬梁、柱、剪力牆及樓板，再用桿件元素(truss)模擬鋼筋，並在混凝土 D-P 元素當中採用考慮壓力破壞點。地震分析，並針對此中高樓層進行模態分析經確認選擇第一振態與日本的振態簡化公式相符，如圖十五；並且針對此模型進行側推(push over)分析，則側推分析負載則是採用日本建築法的單向水平力施加，並觀察力量和位移的變化，圖十五。

最後再輸入地震波對模型進行反應譜分析，並觀察 Mises 應力結果，可發現縱向因為沒有剪力牆作用故結構勁度較軟，大部分應力集中於結構物底端及樑柱接頭區，而橫向因為剪力牆作用故大部分應力集中於剪力牆兩端處，由此結果可以有效判別在地震作用下，因各樓層受不同的加速度作用所造成的影響程度不同，依照分析結果的判別，可安置地震檢測器，以監測結構的安全性。



(a) 自然頻率分析

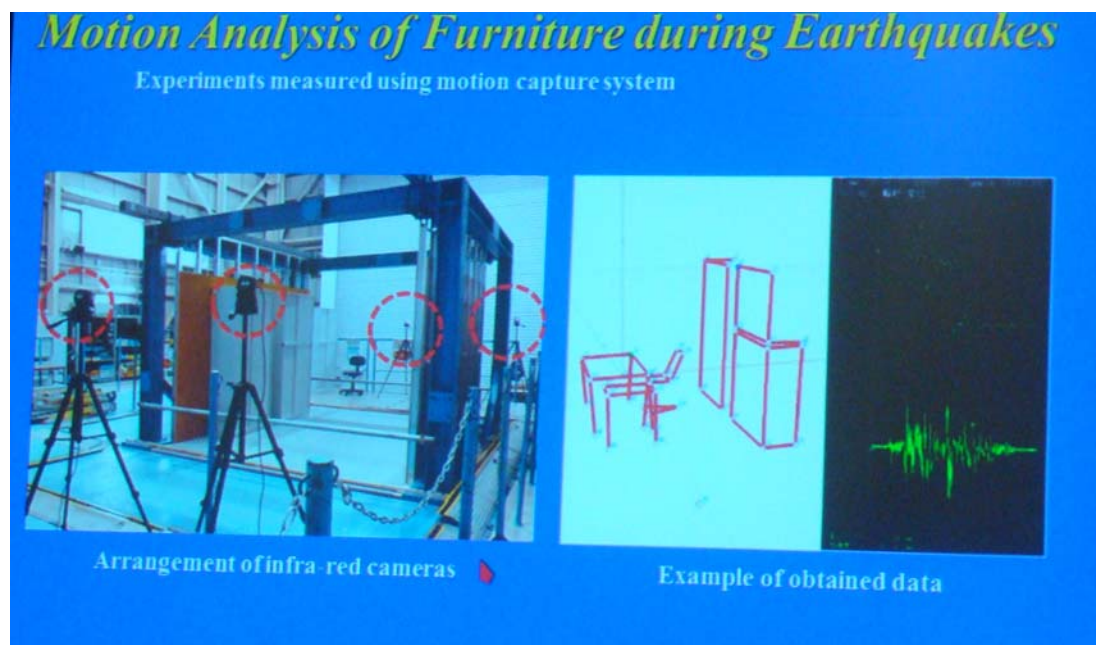


(b) 非線性側推分析

圖十五 建築結構自然頻率分析與靜態非線性位移分析

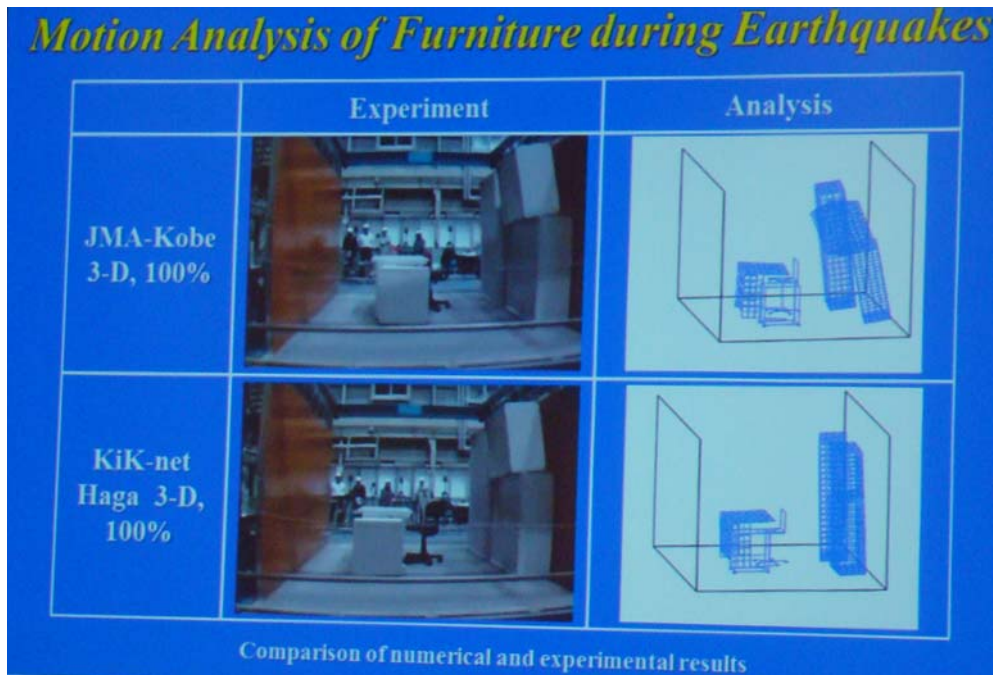
2. T. Miura 等人發表「Finite element motion analysis of furniture under seismic excitation」，此

篇為日本筑波大學之研究，利用有限元素數值模擬軟體，模擬一般家具在地震作用下的反應行為，在大地震來時，一般家具放置於學校和家中，容易因為固定不當或不當設計造成家具在大地震下倒塌，甚至造成逃生路線上的阻礙；又或者是在小地震下結構物並無損壞，但內部家具已經形成嚴重的坍塌。為能計算構件變形及應力狀況，利用有限元素法模擬家具於地震作用下的結構行為，但此計畫因模擬相當細緻，須耗費較多的計算資源。因此，模擬地震下倒塌之行採用 ASI-gauss 積分，利用罰函數(penalty)進行摩擦接觸模擬，並與實際輸入一個 sine 波於振動台進行試驗，再將模擬結果與試驗結果進行比較。為了能將測試條件建立在數值模型中，並完整地比對家具在地震時的動態反應，採用紅外線攝影機，紀錄振動台測試過程，如圖十六。此家具模型採用簡化的梁元素進行模擬，並在家具的桌腳底部設定 X 向和 Y 向的靜摩擦和動摩擦係數，經模擬與測試結果比對，大致相符，故數值模擬可準確的預測家具於地震作用下反應行為，如圖十七。但為了進一步能預測家具於地震作用下，能否具有足夠時間可供逃生，分別採用不同重量參數和固定之邊界條件情況進行分析，其結果可發現在同一個地震條件作用下有栓鍊子的櫃子較慢倒塌，重量 150 公斤重的櫃子較 75 公斤重的櫃子較晚倒塌。



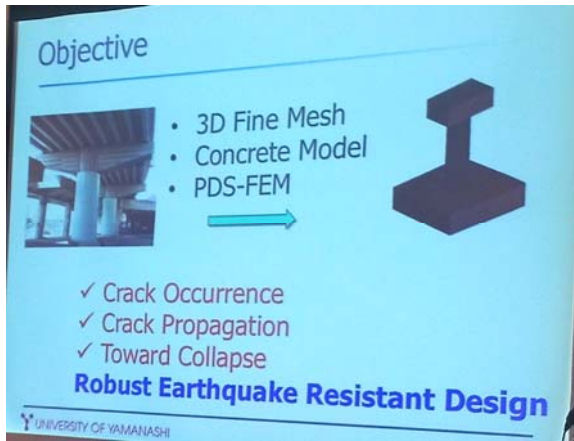
圖十六 採用紅外線攝影紀錄地震測試過程



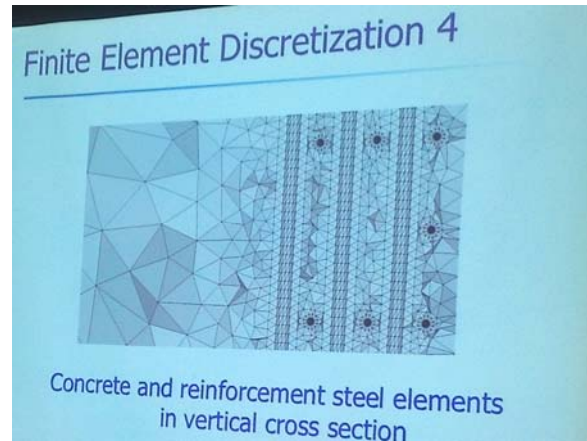


圖十七 家具之地震反應模擬與試驗結果比對

3. S. Okazawa 等人發表「Seismic response analysis of reinforce concrete pier with concrete solid and steel beam elements」，此篇為日本山梨大學和廣島大學共同之研究，由於日本和台灣同樣處於頻繁的活動地震帶，交通建設的耐震性能相當重要。一般地震對橋樑結構的破壞，大多是在橋柱底端產生塑性鉸，而一般的單自由度的簡化分析系統，無法觀察至構件上的局部破壞行為，故需採用有限元素法的實體元素建模與分析，實體元素可模擬混凝土開裂、裂縫的開裂路徑，並依照實際配筋狀況建模，利用四面體彈塑性損壞元素模擬混凝土、梁元素模擬鋼筋行為，兩者之間利用 MPC 技術進行交互模擬，如圖十八。為模擬實際之狀況，於分析和試驗均需於橋柱頂部施加軸力，以模擬橋面板的負載，完成分析後再與實驗結果進行比對，其觀察試驗橋柱頂部的位移結果相當準確。並由混凝土的損壞元素，觀察得知混凝土的開裂損壞情況，另外也採用單向彎矩負載試驗，來觀察混凝土受彎矩作用於底部開裂之情況，如圖十九，其結果顯示能應用數值模擬，預測橋柱混凝土開裂之情況。並且進行地震反應分析，經比較確認此模式也能預測到在地震作用下橋柱損壞之橋況，如圖二十，故能以此分析作為橋柱耐震設計之依據。

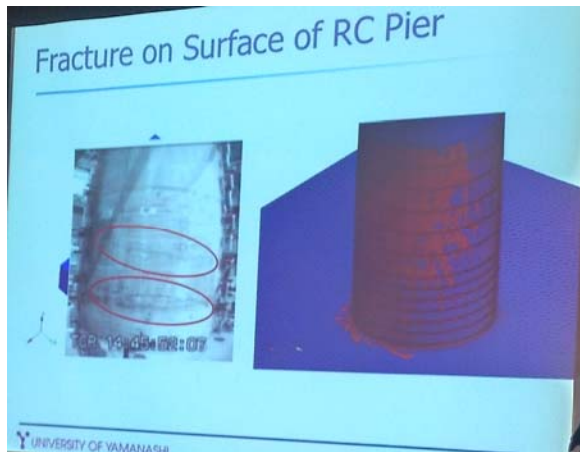


(a) 橋梁建模預定目標

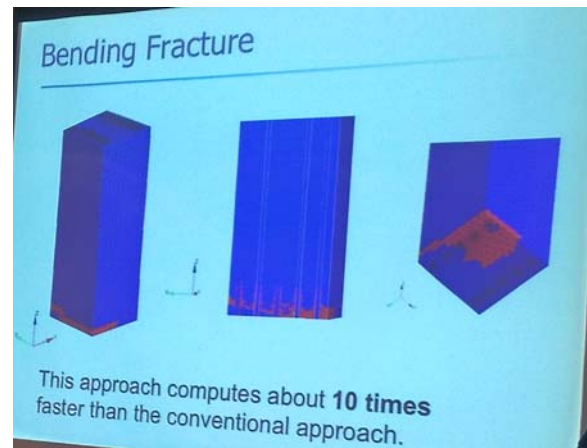


(b) 鋼筋混凝土裂縫模擬

圖十八 橋柱有限元素建模及鋼筋混凝土之模擬

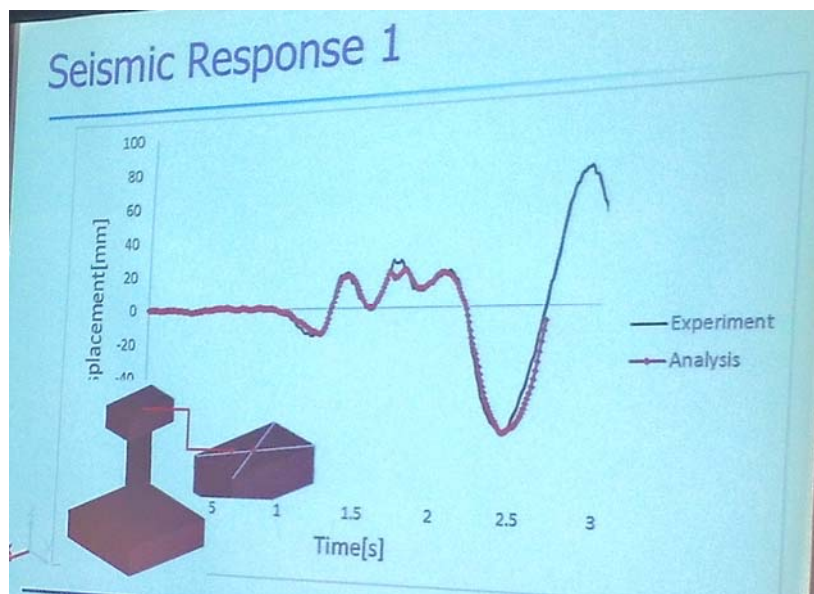


(a) 橋柱混凝土裂縫



(b) 橋柱混凝土裂縫模擬

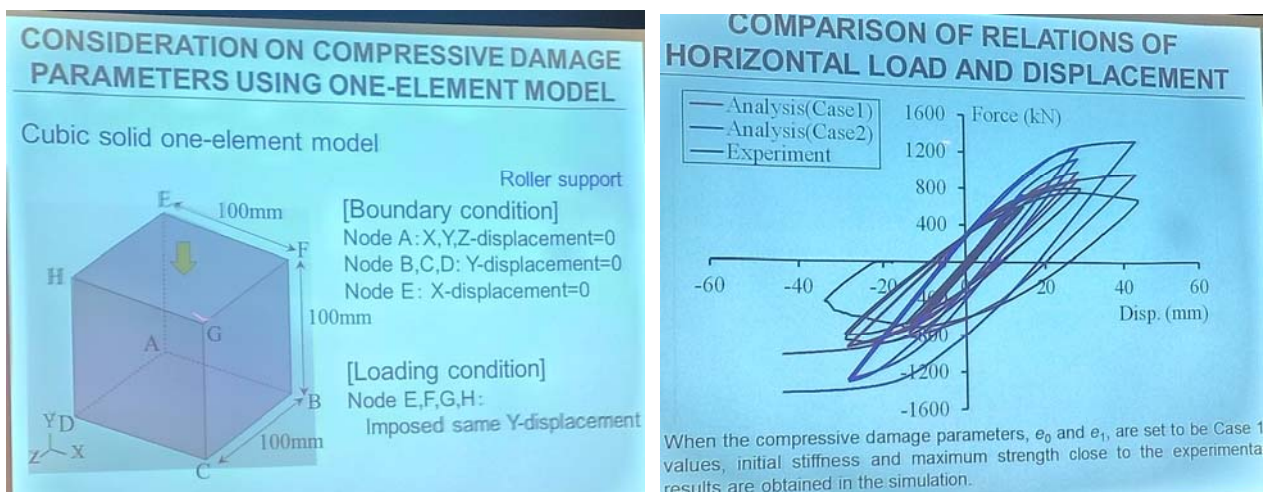
圖十九 橋柱混凝土破壞觀測與數值分析結果比較



圖二十 地震反應之試驗與分析結果比對



4. Hiroyuki Tagawa等人發表「Detailed finite element analysis of concrete-filled-tube column using E-Simulator with extended Drucker-Prager model considering tension crack and compressive damage in concrete」，此篇為日本武庫川女子大學之研究，利用D-P模型考慮混凝土的開裂裂縫損壞，採用有限元素模擬SRC鋼柱。SRC鋼柱則為高強度混凝土填充的鋼管柱，承受一個靜態循環性的負載，模擬其結構實體網格的損壞情況，並利用D-P模型考慮混凝土開裂和受壓損壞，並與實際實驗結果進行驗證比對。
- 為了校正壓縮的破壞參數並且控制元素的密度，利用一個正立方體元素進行施加位移定義出損壞參數，再針對鋼管柱進行非線性靜態分析，依照結構模型的輪廓進行遲滯迴圈的繪製，並與實際實驗進行比較，其比對結果在結構彈性初始階段，皆能準確的模擬結構之行為如圖二十一。



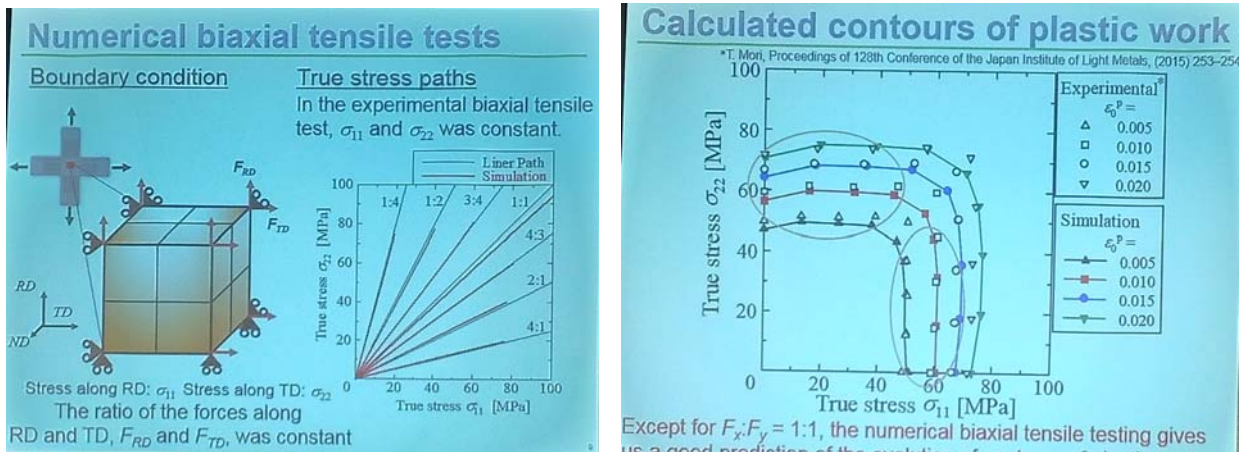
(a) 混凝土損壞參數

(b) 混凝土試驗結果

圖二十一 混凝土損壞參數與分析試驗結果

5. Ming-Jyh Chern等人發表「Numerical biaxial tensile test of aluminum alloy sheets based on crystal plasticity finite element method」，此篇為日本東京農工大學之研究，為了精準的預測金屬鋁合金板的龜裂和塑性下的皺折的行為，鋁合金的材料性質模擬的準確性具有相當的重要性，故此研究利用有限元素模擬軟體(Abaqus)，並實際試驗進行雙軸拉力試驗，進行比較與模擬技巧改進。為了能成功進行雙軸拉力試驗，所採用試體為十字型的拉力試片，X向和Y向負載以比例的方式施加，並利用目標塑性應變值為0.005至0.02的方式

進行；而在數值模擬中，採用三維正立方體的方式，給予邊界條件，進行雙向負載的數值模擬，結果發現除了1:1的的施加之外，其餘比例的施加方式皆能準確的進行模擬預測，圖二十二。

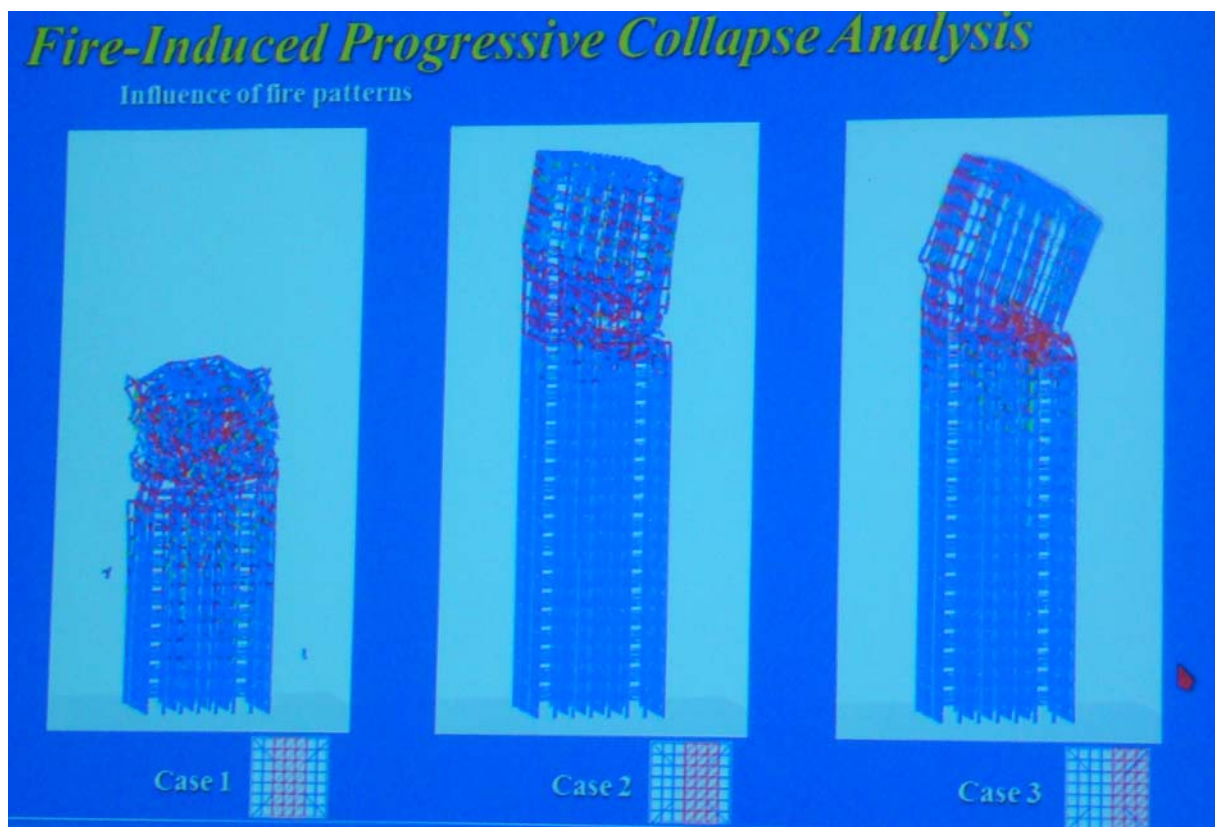


(a) 數值分析模擬雙向試驗

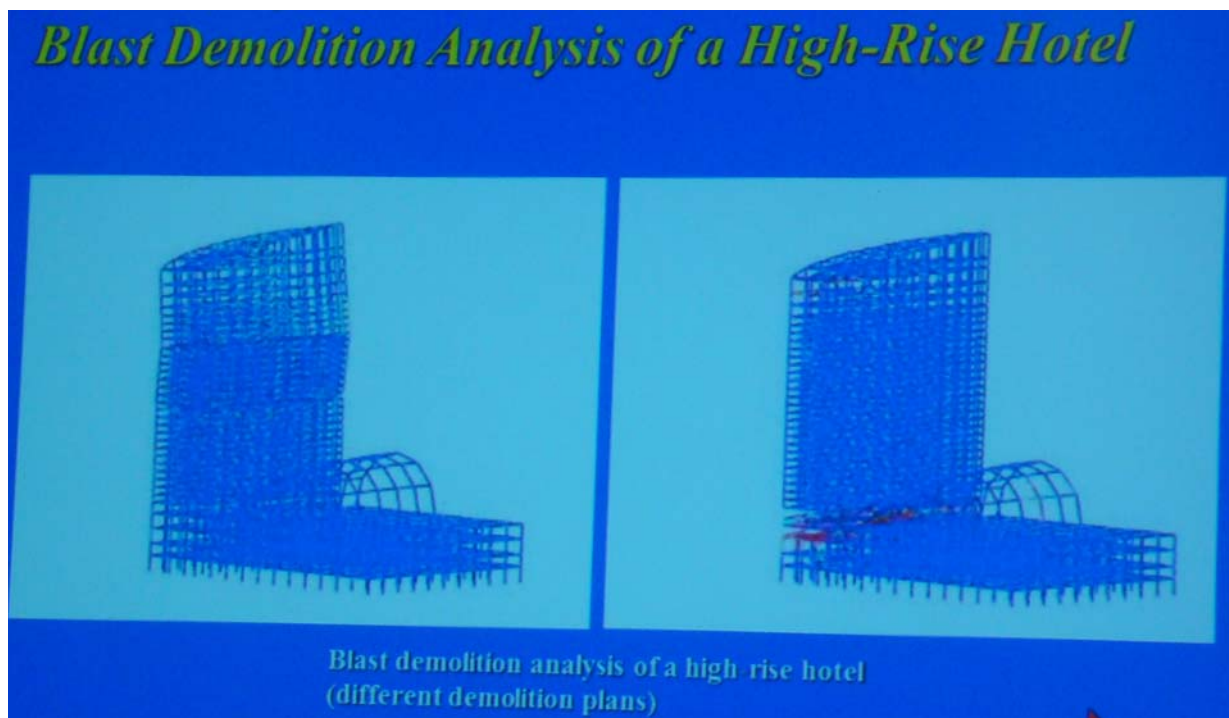
(b) 試驗與模擬比對結果

圖二十二 雙軸試驗邊界條件模擬與試驗結果比對

6. D. Isobe等人發表「A finite element approach to analyze large-scale collapse behaviors of buildings and motion behaviors of non-structural components」，進行有線元素大變形分析研究，首先是大火導致樓房倒塌的分析，如圖二十三所式，三種火災的區域導致各有不同的樓房變形，且並不一定都會倒塌，由模擬結果可知，在材料模式上應是進行相關試驗，使模擬結果貼近事實。此模擬以動畫進行展示，亦可藉此了解何時發生倒塌。
- 第二個例子是以爆破方法進行樓房的拆除，此種拆除方法會發生瞬間的倒塌，可能會損及鄰近設施，故有必要在施工前了解是否可順利拆除，以及了解可能的破壞範圍，以便納入施工管理，圖二十四顯示爆破位置設於垂直方向樓層面積漸變之處，可使樓房拆除順利、不會損毀鄰宅。第三個例子是評估地震作用下，樓房結構是否會產生碰撞或倒塌，圖二十五為模擬結果，地震波型的模擬並問題，而樓房結構確實會有因地震發生碰撞的危險。這些例子均以動態展示的方式，來說明計算能力與準確性，無論是開始破壞的位置與時間、倒塌過程、碰撞範圍、整個建築物損毀範圍與發生時間，均能透過動畫的方式呈現，對於成果溝通非常有幫助，值得我們學習與應用。

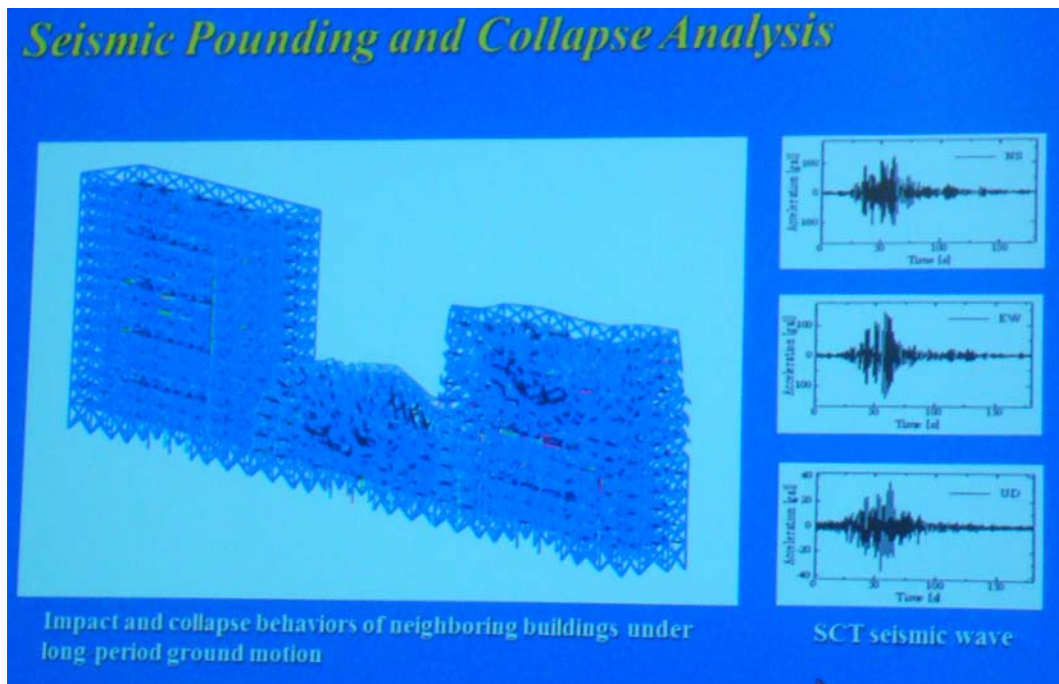


圖二十三 大火導致樓房倒塌分析



圖二十四 爆破導致樓房倒塌分析

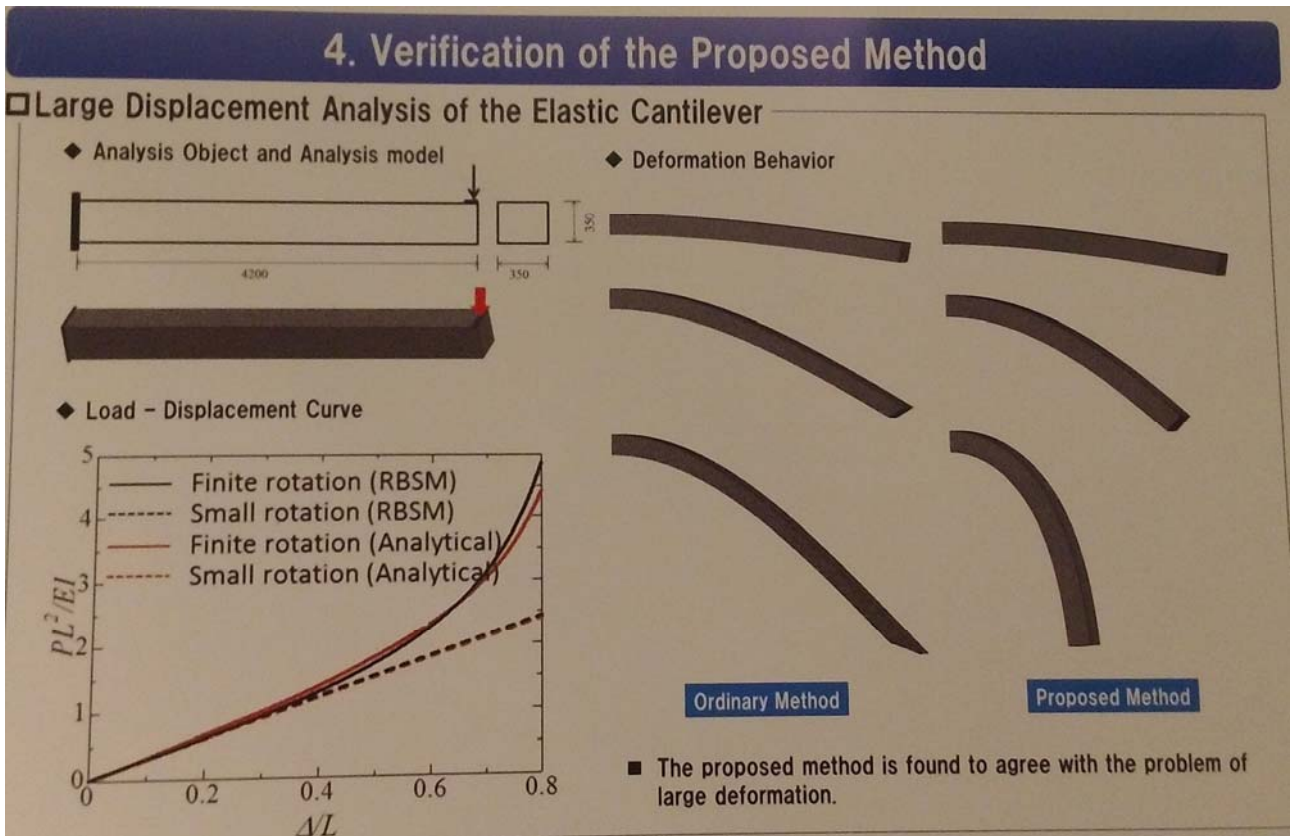




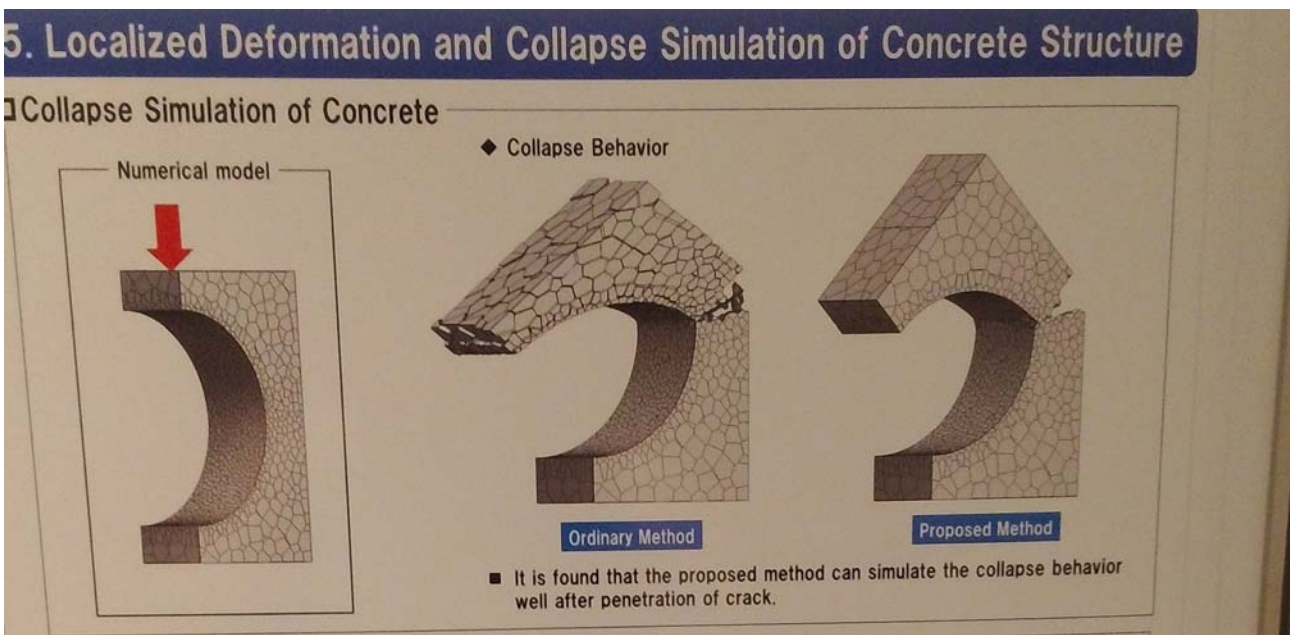
圖二十五 地震導致樓房撞擊及倒塌分析

7. Y. Isaji 等人發表「Localized deformation and collapse simulation of reinforced concrete structures by three-dimensional RBSM considering finite rotation」，本篇為日本名古屋大學之研究，利用離散數值法的三維剛體彈簧(RBSM)，模擬鋼筋混凝土結構物倒塌和扭轉變形，採用 RBSM 法可以有效的模擬開裂和混凝土受剪開裂的裂縫路徑傳遞，若是單純只用有限元素法，只能分析出混凝土受力情況，無法針對混凝土開裂之裂縫延伸進行模擬，本研究的方法確認，是建立多種模型比對，確認此方法的可靠性之後，再延伸至鋼筋混凝土結構。

數值分析的比較，針對懸臂梁採用一般數值法及RBSM法進行有限轉角的分析，其分析結果證明RBSM法能有效的模擬大變位之情況，並且在針對混凝土局部變形進行比對其結果也證明RBSM能有效地進行混凝土局部性開裂的模擬，圖二十六。由鋼筋混凝土柱的數值分析與試驗結果進行比對，可發現一般方法和RBSM法與試驗結果尖峰點大致上接近，但隨著位移繼續增加開裂過後的軟化行為，可發現為RBSM法較為接近實際實驗結果，能夠模擬混凝土柱的軟化行為，圖二十七。



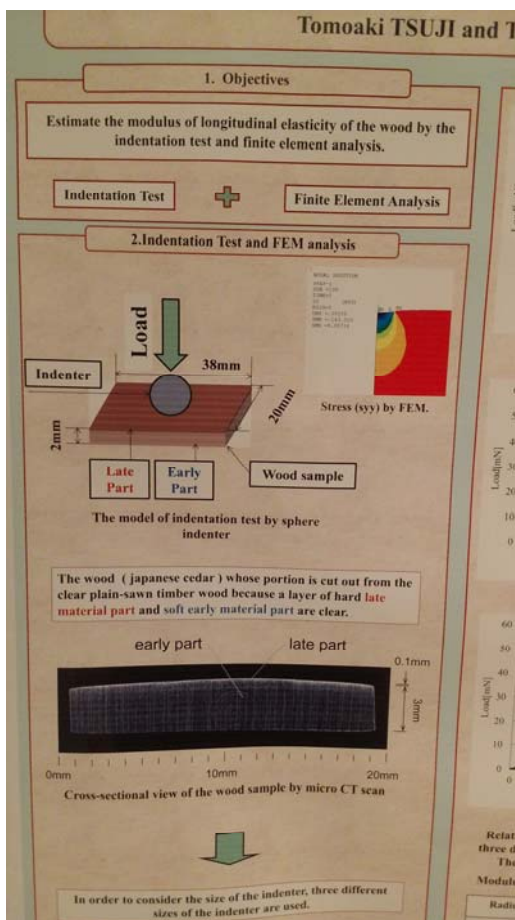
圖二十六 RBSM 離散數值法針對懸臂梁驗證



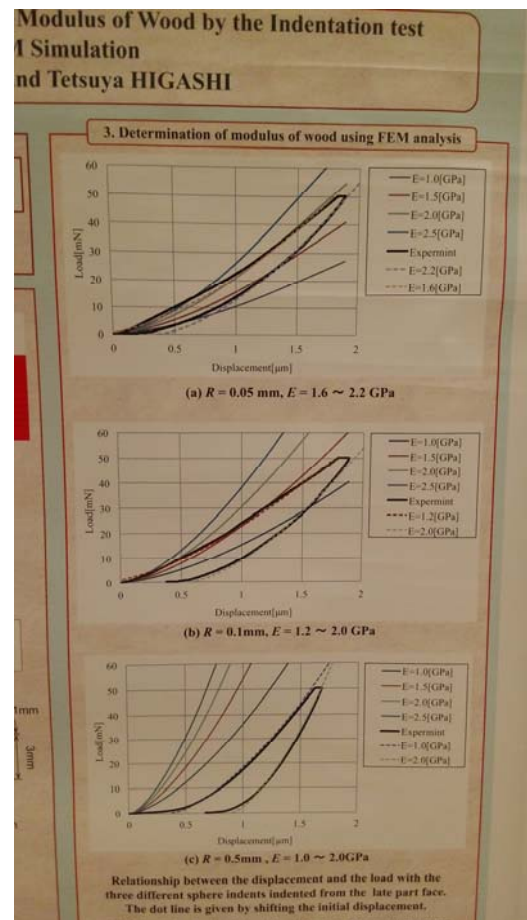
圖二十七 RBSM 離散數值法針對混凝土柱驗證

8. T. TSULI 等人發表「Identification of longitudinal elastic modulus of wood by the indentation test and FEM simulation」，本篇為日本中央大學利用有限元素模擬木材的縱向壓力測試，建築物的建材生產、營建、運輸到建築物拆解到最後的廢棄物罐處理的生命週期。

木建材可有效地進行生命週期的循環並對周遭環境影響降至最低，故此作為結構的木材之機械性質為相當重要。首先，木材的組成相較於金屬材料性質較為複雜，在此研究中所採用由初期和後期所生成的木頭製成 2 mm 的木板進行負載(最大值 50 MN)，圖二十八(a)，則負載球體半徑有 0.5mm、0.1mm 和 0.05mm，並利用有限元素軟體 ANSYS 利用黏彈性模型輸入彈性模數、柏松比和鬆弛的時間考慮時間的方式進行試驗分析，並與試驗結果進行比較，圖二十八(b)，由分析結果發現試驗結果與分析初始位移曲線相當吻合，可準確的評估木頭晚期生成的彈性模數。



(a) 測試模型



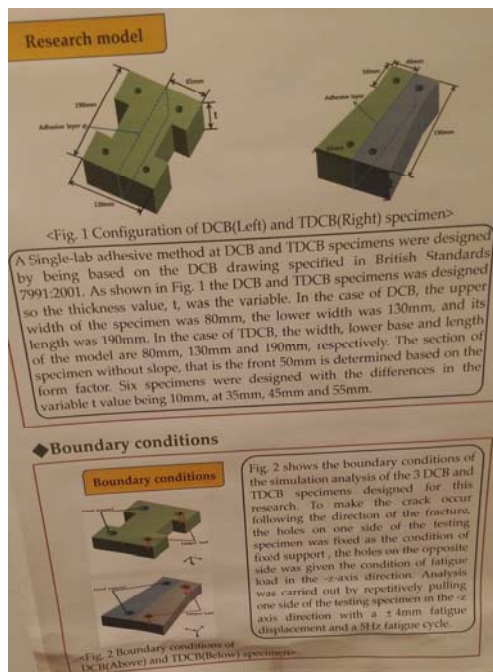
(b) 分析結果比對

圖二十八 木材的力學特性測試與 FEM 模擬比對

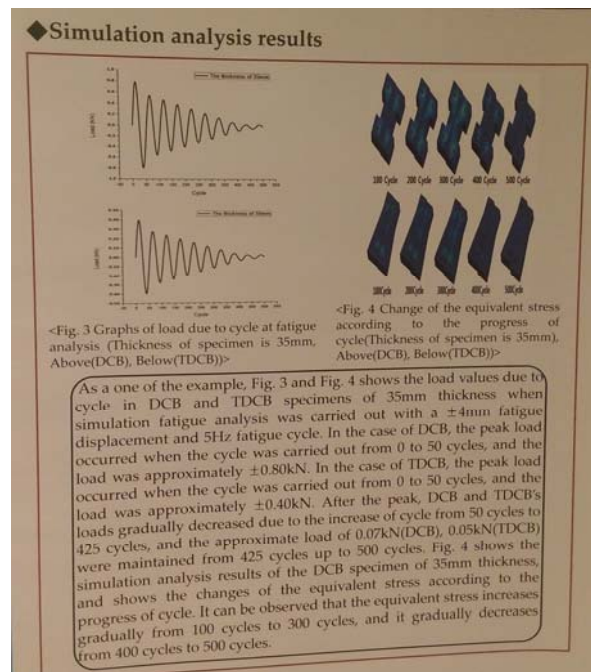
9. Jung Ho Lee 等人發表「An effect of low strain rate on the fatigue properties of a specimen with inhomogeneous materials」，本篇為韓國公州大學機械工程針對非等向性材料應用於低速率疲勞性能試驗，並採用 ANSYS 疲勞模組進行分析，以分析材料再不同能量反覆作用



下的使用壽命評估，並將分析結果與試驗進行模擬，此項試驗結果可應用於高科技材料上和安全設計等多種應用領域，利用 ANSYS 進行 DCB 和 TDCB 的建模並利用低速率疲勞試驗針對 DCB 和 TDCB 的厚度進行使用性的設計，則所進行厚度設計參數為 35mm、45mm、55mm，圖二十九，由分析結果觀察得知在厚度 35mm 輸入 5Hz 的疲勞循環負載之後，試體最大負載皆在於前 50 個循環中並且產生負載最大值(0.8kN)，但經過 425 個循環之後試體負載遞減至 0.07kN，而厚度 45mm 前 50 個循環中並且產生負載最大值(0.98kN)，可得知厚度的增加試體負載將會增大並且 DCB 形狀的設計將會產生較大的負載，並與實際實驗比對為相當相近，固可利用有限元素軟體來針對低速率疲勞進行預測分析。



(a) 試體厚度設計



(b) 疲勞分析結果(厚度 35mm)

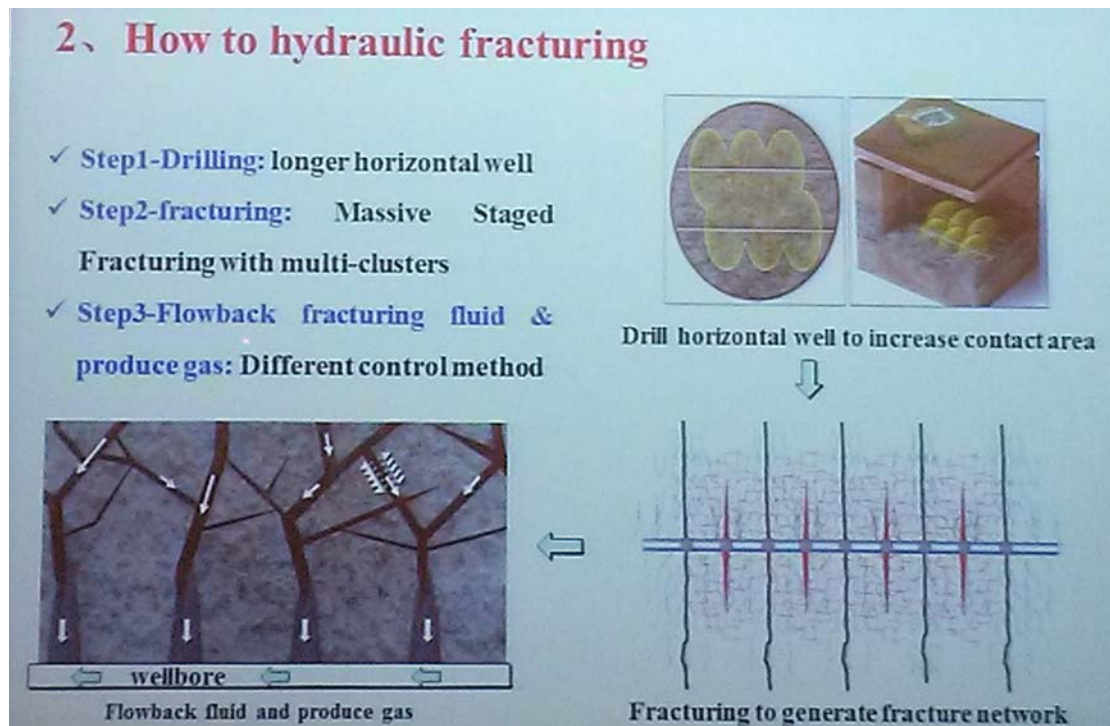
圖二十九 疲勞特性測試與 FEM 模擬比對

## (七) 水力壓裂法

1. J. Gau 等人發表「Key mechanical problems in the hydraulic fracturing of shale gas reservoir」，說明由水力壓裂法與水平鑽井技術而使目前頁岩氣開採成為趨勢，頁岩氣與傳統的油氣差異：頁岩氣是屬於連續且大範圍、傳統油氣是不連續且小範圍；頁岩氣包含被吸收的氣體與自由氣體，傳統油氣是自由氣體；頁岩的孔隙屬奈米級，傳統油氣田的岩石孔隙為毫米級；而滲透性也是奈米達西與毫米達西的差距。水力壓裂的程序如圖三十，包括

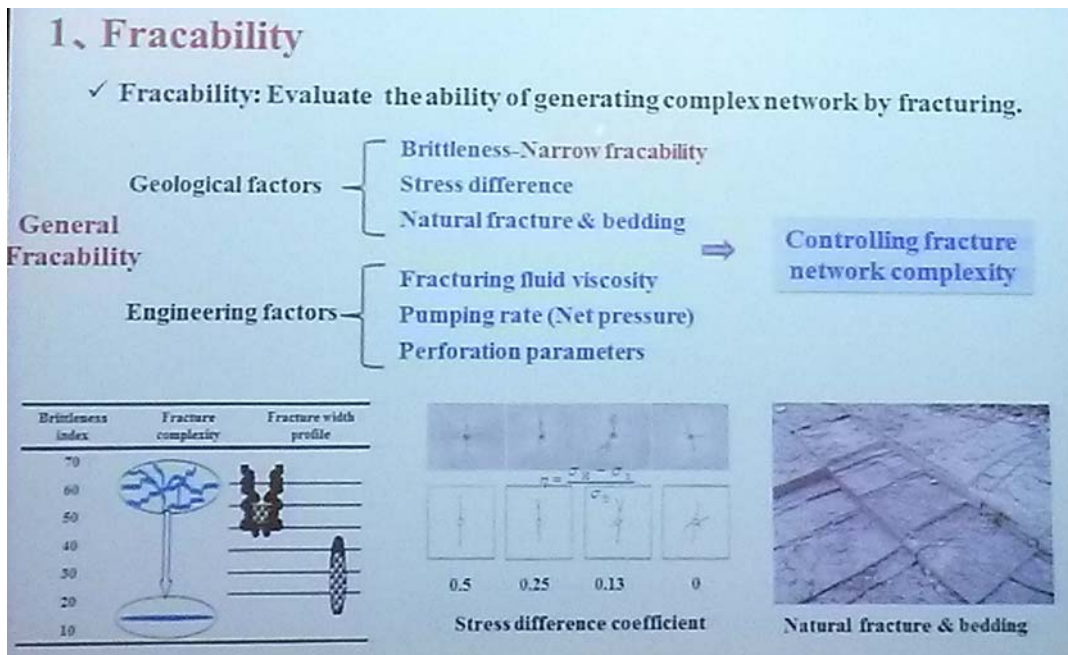
第一步為施鑽水平井，以增加與岩體的面積；第二步為多階的栓塞水力壓裂，製造裂隙網路；第三步是將壓裂液反排並開始生產油氣。在岩石力學特性方面，需考慮地質結構的特殊性、不同應力條件下之力學特性、不同油氣田的深度，例如美國 Horn River 深達 2500~3000 m、中國 Yongchuan 深達到 3000~4500 m。

油氣田是否具有水力壓裂的可行性(Fracability)，當然是探油公司急欲了解評估的項目，此評估主要是了解藉由水力壓裂過程是否可在岩體產生複雜的裂隙網路，評估須包含兩方面：地質因素、工程因素，地質因素包括岩體脆性、應力差的幅度、自然裂隙與層面的分布；工程因素包括壓裂液的黏滯度、灌注壓力、穿孔參數(Perforations parameter)，如圖三十一。在進行水利壓裂法的準備，可對於裂隙開始形成並進而擴展進行數值模擬，以作為工程參數決策的參考，此模擬需考慮材料的組成律、應力分布、裂隙形成的模式、工作流體特性，如圖三十二所示。

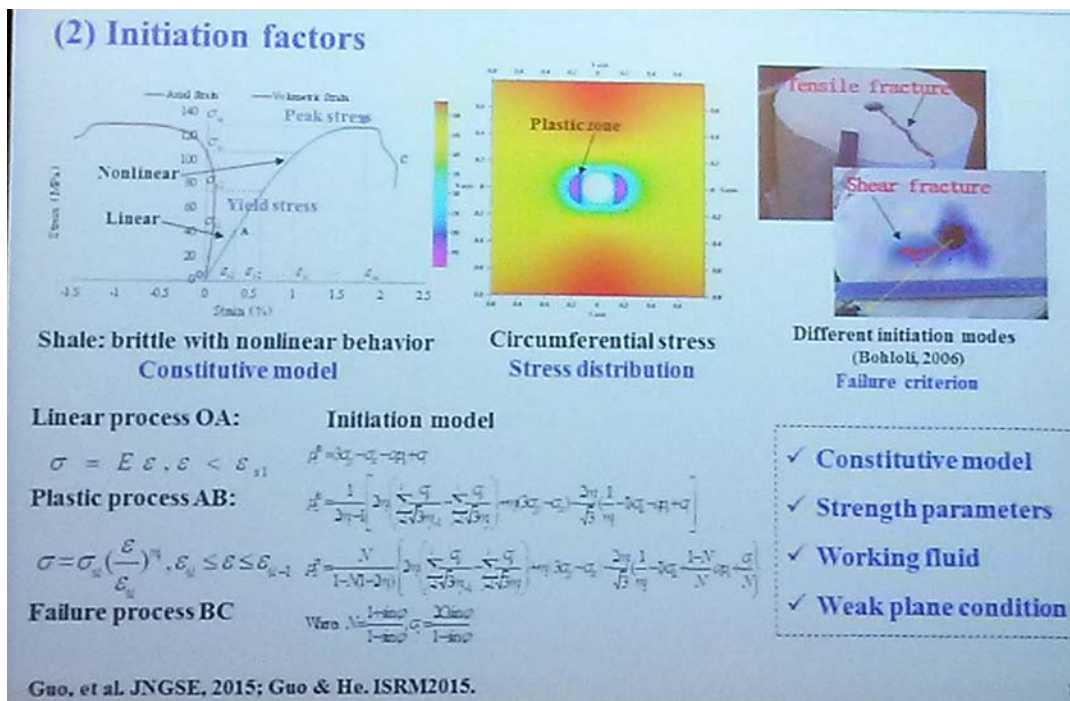


圖三十 水力壓裂法採集頁岩氣之步驟





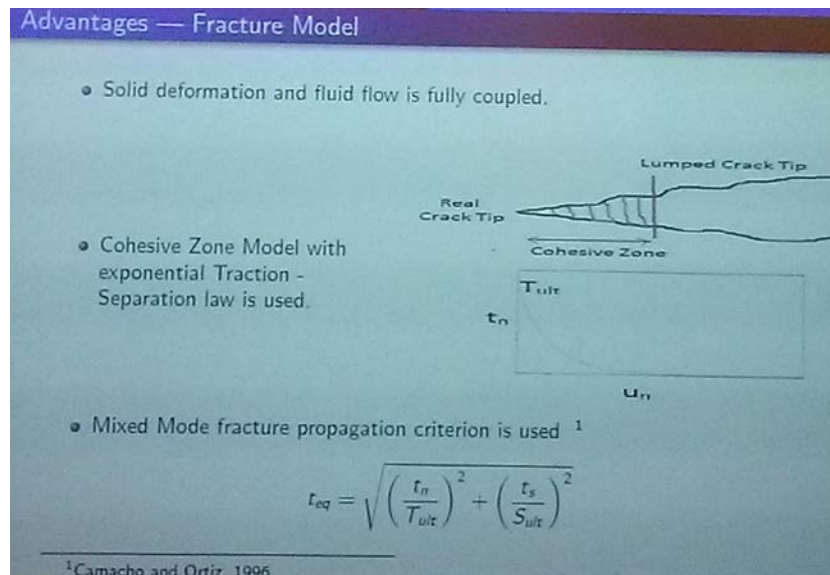
圖三十一 可壓裂性的評估要項



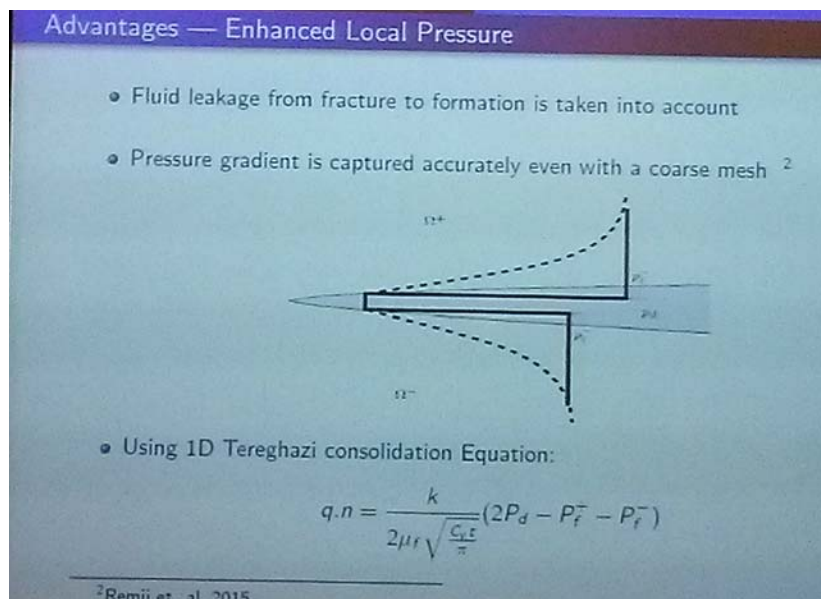
圖三十二 岩體裂隙受水力壓裂形成與擴展之模擬要項

2. V. Valliappan 等人發表「Modelling of hydraulic fracturing in anisotropic and heterogeneous media」，對異向性與異質材料的岩石裂縫成長進行模擬技術改善，建模流程包括動量守恆考慮應力應變關係、組成律、邊界條件、不連續性；裂隙內的質量守恆考慮流體洩漏與壓密函數；整體質量守恆則考慮達西定律。而對於裂隙的模式考慮，包括流體與固體變形採用耦合模擬，使用混合模態的裂縫成長模式，如圖三十三(a)所示；對於局部壓力

的模擬亦盡量貼近真實，包括考慮流體會由裂隙外洩至岩層、壓力呈現梯度分布、考慮壓密效應，如圖三十三(b)所示。另外，對於組成律則考慮孔隙彈性係數，並採用 Tsai-Hill 的破壞準則來預測不同條件下的極限強度。



(a) 裂隙模式

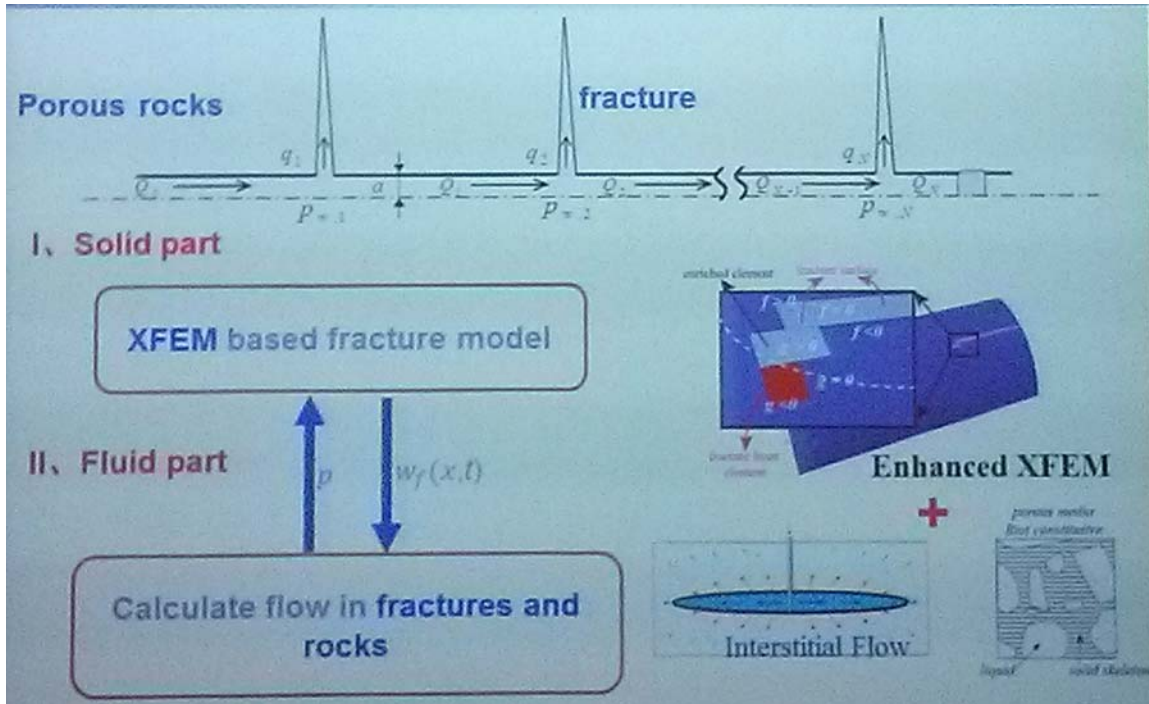


(b) 局部壓力模擬方式

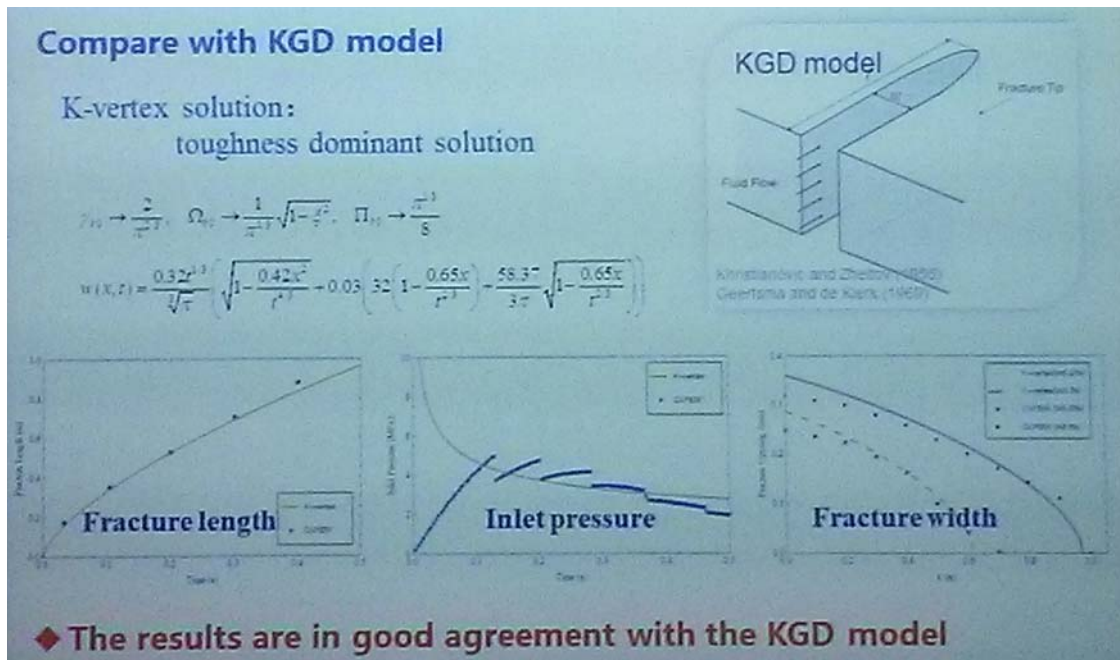
圖三十三 岩體裂隙擴展之模擬改善方式

3. T. Wang 等人發表「Deformation-diffusion-flow coupled XFEM method for modeling hydraulic fracture in porous media」，本研究期望能將有限元素之流固耦合應用於水力壓裂過程，計算裂隙的間質流體(Interstitial flow)與岩石內的孔隙液體流量，分析模式如圖三十四，和

Khristianovic-Geertsma-de Klerk (KGD)的理論裂隙模式比較，不論在裂隙長度、流入壓力、與裂隙寬度均非常接近，證明數值模式的可用性，如圖三十五，並且將此數值模式用於實際多裂隙的案例。



圖三十四 裂隙模擬之流固耦合建模方式



圖三十五 岩體裂隙數值模式與理論分析比對



## 三、心得

### (一) 數值分析與觀測及數學模式需互相比較

數值分析是在數學模式的推廣，藉由將處理對象網格化的工作，使得該對象各個部位均能獲得特定條件下的結果。這也是分析者採用數值方法為工具，在該條件下進行觀察研究，因此分析者須能判定數值分析是否合理，而提供信心的另一種方法，應是與觀測結果比較，但須觀測的條件須正確設定，或者是依照數值方可行的參數，進行試驗。而試驗的長期觀測，亦可能改變數學模式，例如材料模式就是最常見的例子，因此分析者對於數值分析、觀測、數學模式均應有所了解，才能做好以數值分析進行預測的工作。

### (二) 不同尺度數值模式之整合

例如海嘯分析、地下水流分析或是核能電廠地震反應分析，對大尺度的模式，要採用數值方法建立網格數量龐大的模式，面面俱到的計算，並非絕對必要，最好是區分為各種尺度進行數值模式分析，由觀測或試驗結果比較，對掌握不同尺度的特性，較能成功、也較具信心。大尺度的分析結果，也是中小尺度模式輸入，例如海嘯分析在海域的波傳是用一維淺水波程式、到了近岸是用三維水動力程式、對於結構物的影響則須採用更精細的方法；整廠的地震反應分析，可建立樓板反應譜，做為系統組件的分析輸入，系統組件則須再建立個細緻模式，但對於太複雜無法模擬的主動設備，則由系統的地震分析結果，提供反應譜作為耐震測試之需。

### (三) 邊坡穩定分析方法多樣性

數值方法在土壤、岩石材料的應用上，一直不斷是研究者持續挑戰的課題，這些自然材料結合地形與外在條件，例如地震、降雨，引發的崩塌、土石流自然災害，即使在目前人類已享受眾多的科技成果，但每年仍可見世界各地發生此類災情，顯現這些老問題仍存在無法準確預測的瓶頸。本次會議提出不少此方面的論著發表，也強調現地觀測與大型試驗的比較，驗證程式準確性。不過，對於整體的災害危害度並未討論，也就是如何決定數值分析的輸入條件(設計需求)，此種決策須考量各種不確定性；另外，則是應考慮土壤、岩石的演化，及所處環境的變遷問題，方能使預測的設定條件與實際發生情形相符。

#### (四) 水力壓裂應用

岩石裂隙的破裂方式與成長型態，是岩石力學重要的研究方向，教科書均會舉例說明，以提醒讀者在處理岩石問題，因裂隙的存在，不同的力學條件可能會有截然不同的現象。水力壓裂是運用裂隙產生而獲取人類經濟利益的方式，因此刺激了這個議題的研發。由本次會議的發表來看，對裂隙的處理幾乎沒有提到離散裂隙網路(DFN)，這和曾參加的岩石力學研討會有所不同，可能此會議參與者缺乏裂隙岩體地質調查背景，或者是頁岩屬於軟岩，DFN的影響較不明顯。由於水力壓裂除了人為注水，也有可能是受到環境內的氣體遷移或地震事件而觸發，為了研究岩石裂隙的力學模式，以供核能地下工程使用，應多加考慮岩石特性及DFN參數，採用較適於岩石裂隙應用的分離元素法軟體，例如3DEC，可輸入DFN進行此類項研究。

#### (五) 電腦圖形展示之決策應用

此會議中見識到電腦數值模擬與計算分析的結果，應以電腦圖示方式，加以呈現，尤其是動態模擬，歷時分析的結果應該以影片的方式進行播放，使觀眾可以了解破壞開始到結束的過程、破壞影響的區域、以及受到衝擊的物體之動態行為，例如邊坡穩定模擬、海嘯模擬、樓房倒塌模擬、飛機機翼受到鳥擊的模擬、輪胎與路面接觸模擬、家具設備地震時的運動模擬等等，目前的技術均可做到動態展示。就模式驗證而言，可以與試驗過程完整的比對，修正模擬的誤差；對於防災的決定、法規制定、或是公眾的溝通，能夠提供相當好的資訊，像本次會議的海嘯模擬，是整個城市的疏散計畫依據，防災官員可根據此模擬結果，了解淹水範圍、海浪的衝擊力、受上溯海浪衝擊使得車輛或漂浮物在市區的影響程度，這些資訊如果沒有動態模擬，防災計畫的考量層面必定會有所遺漏。再者如樓房爆破拆除分析，其需求是為了說服民眾了解爆破的影響，類似環境影響評估的一環，但如果沒有此模擬，恐怕提供很多理論分析、或是龐雜的數學計算，民眾也是一頭霧水，反而會讓民眾覺得有技術的傲慢，對溝通成效是減分。我國在地震防災的計畫中，已經強調境況模擬，可參考其他國家的做法，將數值模擬動態展示結合，如此訂定防災計畫則較為妥善。而核設施目前雖有風險評估，但欠缺境況模擬，宜學習其他領域加以強化。

#### (六) 材料模擬的準確性為數值方法關鍵

由本次的會議來看，數值模擬要精確，需對材料模式要能精準掌握，例如邊坡穩定模擬、

水力壓裂模擬、混凝土結構破壞模擬，單有理論方法是無法做到與自然現象一致，需有豐富的試驗基礎、再加上細緻的材料組成率與破壞準則，模擬與試驗比對才能進行。如果要達到此種程度，則數值模擬的從業人員，也應了解材料試驗，這才能使模擬工作不會落入「Garbage in, garbage out」的盲點，才能自我檢視成果合理性，也就是做到模式 Validation。因此，未來在本所進行分析工作的人員，應要求進行試驗規劃，學習驗證技巧，使本所數值分析能力具可靠度、並提升信心。

### (七) 有限元素法應用於混凝土工程

國內土木工程結構發展至今自 921 大地震以來，諸多的學者針對國內耐震設計規範進行了大幅度的修訂，雖然設計者可以遵循規範來進行建築結構設計，且國內學者雖有針對相關結構進行分析研究，但大多數為結構桿件的分析，少數有針對整體實尺寸進行研究，若有整體尺寸分析但多數為簡化過後的自由度系統，無法觀察在整體尺寸作用下局部構件應力行為，可是大型結構物的複雜程度和土木工程諸多材質屬高度非線性、且非等向均質材料，容易在地震作用下產生超乎預期性的行為，故本次會議特別針對大型的土木結構工程，利用有限元素數值模擬軟體進行受震作用下行為的預測，並與實際試驗的方式來驗證數值模擬結果。

以數值模擬觀點來看本會議相關土木結構有限元素分析，大多數著重於混凝土受拉開裂及裂縫路徑的行為模擬，因有限元素數值模擬準確與否，關鍵絕大多數在於材料的力學性質是否能準確的模擬，因通常有限元素法皆是應用於金屬材料模擬，若針對混凝土進行模擬，混凝土的極度非對稱的受力行為和考慮混凝土材料的變異性，其模擬準確性仍需有待探討，由此次會議具有多種的模擬方法針對混凝土材料性質和鋼筋和混凝土複合材料的結合方式進行模擬，可增進我國在有限元素數值模擬相關知識，進而增進模擬技術。

## 四、建議事項

### (一) 強化數值分析模式驗證能力

數值分析模式須結合數學模式或理論、及觀測或試驗結果，才能提供可信賴的預測，研究人員應強化各項能力。

### (二) 增加多尺度工程分析之介面整合能力

數值分析工作應考量不同尺度的模式，並由分析結果的資料傳遞，建立檢討數值模式是否合適的能力，並在計畫分工時能發揮整合能力。

### (三) 岩石裂隙力學模擬技術開發研究

岩石裂隙的力學穩定性對相關應用均屬重要課題，宜積極訓練專業人員投入數值模擬，並且進行參數分析以獲得模擬經驗，建立相關核能應用技術。

### (四) 高性能電腦分析案例之經驗累積

目前本所工作大多採用個人電腦完成，在大範圍或是更細緻的計算較少執行，為計算力學能力欠缺之處，可朝此方向發展，並拓展研究視野。

### (五) 整合式系統失效展示研究

對於核能設施的失效評估，本所已有系統化工作，但尚欠缺展示能力，不易檢視或提供做為討論、以及失效後果的處理，建議加以強化。