

出國報告（出國類別：其他）

## 參加國際地質工程論壇與岩石力學實驗室參訪出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：童琮樟 助理研究員  
張福麟 副研究員

派赴國家：中國大陸

出國期間：104年7月4日~104年7月8日

報告日期：104年7月31日



## 摘要

本次國際地質工程論壇主題是「地質工程、岩石力學、土壤力學與地工合成材料之新理論、新技術、新發展」，藉由國際間地質工程學會專家共同探討工程地質、岩石與土壤力學等領域之國際最新進展和未來發展趨勢，凸顯出岩石力學、岩石工程與風險評估的重要性；岩石力學實驗室參訪硬岩真三軸試驗系統、硬岩三軸潛變試驗機、及多場耦合三軸潛變試驗儀等試驗設備，可應用於放射性廢棄物最終處置之工程技術、岩石力學、與多場耦合等試驗；而大陸方面發展超深地層開挖工程技術遇到的高溫、岩爆、及崩塌等工程風險，將是未來放射性廢棄物最終處置可能會遇到的風險。藉由此次公差，瞭解地質工程最新進展和未來趨勢、岩石力學與風險評估的重要性、岩石力學實驗設備功能等，有助於國內放射性廢棄物最終處置技術發展。

關鍵字：地質工程、岩石力學、風險評估、放射性廢棄物最終處置



# 一、目的

放射性廢棄物最終處置為攸關人類生活與環境保護的重要議題，深層地質處置係為目前國際間普遍採用之放射性廢棄物最終處置方式，其概念係透過工程障壁與天然障壁等組成多重障壁系統，將處置場與人類生活圈隔絕，天然障壁即為影響處置場長期安全的關鍵因素之一，國際間常利用地下岩體做為放射性廢棄物最終處置的天然障壁系統。然而地下岩體的複雜特性如岩體異向性、節理與弱面構造等，往往是影響處置場之工程建造技術與長期安全評估技術的主要因素，因此藉由地質工程、岩石力學與土壤力學的試驗與數值分析技術，以評估地下岩體作為放射性廢棄物最終處置環境的合適性。

2015 年國際地質工程論壇(International Forum on GeoEngineering)於 7 月 5 日至 7 月 7 日在中國大陸瀋陽之東北大學綜合樓 822 室舉行，由國際岩石力學學會(International Society for Rock Mechanics；簡稱 ISRM)主辦，東北大學資源與土木工程學院及深部金屬礦山安全開採重點實驗室共同承辦。本次論壇以「地質工程、岩石力學、土壤力學與地工合成材料之新理論、新技術、新發展」為主題，旨在加強工程地質、岩石力學與土力學等領域之交流與融合，邀集國際地質工程聯合會(Federation of International Geoenvironmental Societies；簡稱 FedIGS)、國際岩石力學學會、國際土力學及岩土工程協會(International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering；簡稱 ISSMGE)、國際工程地質與環境協會(International Association for Engineering Geology and the Environment；簡稱 IAEG)、國際地工合成材料學會(International Geosynthetics Society；簡稱 IGS)等五個國際間地質工程相關領域之學會主席、副主席、及秘書長等專家，針對工程地質、岩石與土壤力學等領域之國際最新進展和未來發展趨勢進行專題演講、研討與技術交流。

論壇並設置有岩石力學實驗室參訪及自然地質技術參訪等行程，岩石力學實驗室參訪行程主要著重在了解試驗設備與研究方向，如深部硬岩之短期和長期力學行為、及硬岩於溫度場、應力場、滲流場與化學場等多場耦合環境下之力學特性等；自然地質參訪行程則主要了解喀斯特地質的特性。藉由上述參訪行程，可增進了解岩石與土壤力學試驗、及地質工程等相關資訊，有助於我國放射性廢棄物最終處置之技術發展。

## 二、過 程

此次公差之行程與工作內容如表 1 所示，其行程為配合論壇之主辦單位國際岩石力學學會之論壇程序安排，參加人員為本所副研究員張福麟與助理研究員童琮樟等二員。

表 1：公差行程與工作內容說明

日期	地點	公差行程與工作內容	
7月4日	桃園市 至 瀋陽市	去程	
7月5日	瀋陽市 東北大學	參與 2015 國際地質工程論壇	
7月6日	上午	瀋陽市 東北大學	參訪東北大學岩石力學實驗室
	下午	本溪市	參訪本溪市特殊自然地質
7月7日	上午	瀋陽市 東北大學	參與紅透山銅礦場岩石力學研究成果之討論
	下午	瀋陽市 東北大學	參訪東北大學岩石力學實驗室與技術交流
7月8日	瀋陽市 至 桃園市	回程	

本次論壇由國際岩石力學學會主辦，大陸之中國岩石力學與工程學會、東北大學資源與土木工程學院、深部金屬礦山安全開採重點實驗室、岩土力學與工程國家重點實驗室等共同承辦，論壇由東北大學特聘教授馮夏庭教授(圖 1 前排右起第七)擔任會議主席，韓國工程院院士 ChungIn Lee(李正仁)教授擔任副主席，論壇開幕首先由東北大學趙繼校長(圖 1 前排左起第六)致詞，而後由國際地質工程聯合會主席 Jean-Louis Briaud 教授(圖 1 前排左起第七)、國際土力學及岩土工程協會秘書長 Neil Taylor 教授(圖 1 前排右起第五)、國際岩石力學學會主席 Eda Quadros 博士(因身體不適，不克到會場，由她先生 Nick Barton 教授代為宣讀論文)、國際岩石力學學會前主席馮夏庭教授、國際岩石力學學會秘書長 Luis Lamas 博士(圖 1 前排右起第四)、國際工程地質與環境協會主席 Scott Burns 教授(圖 1 前排左起第五)、國際工程地質與環境協會秘書長伍法權教授(圖 1 前排右起第二)、國際地工合成材料學會主席 Russell Jones 博士(圖 1 前排左起第三)、國際地工合成材料學會副主席 Chungsik Yoo 教授(圖 1 前排右起第六)、國際岩石力學學會最高成就獎(繆勒獎)得主 Nick Barton 教授(圖 1 前排左起第四)、國際岩石力學學會亞洲分會副主席 Seokwon Jeon 教授(圖 1 前排左起第一)等學者進行 11 篇的專題演講(表 2)，約有百餘位來自國際間各學術單位與研究機構之專家參與本次論壇，共同針對地質工程、岩石及土壤力學、與地工合成材料等國際最新進展和未來發展趨勢展開廣泛的技術交流和研討，是地質工程領域的一次學術盛會。值得一提的是，中國大陸負責放射性廢棄物最終處置的團隊「核工業北京地質研究院」亦有多位專家參與這次論壇。

表 2：論壇程序

7月5日(星期日)	國際地質工程論壇(International Forum on GeoEngineering)	
08:00 - 08:30	報到註冊	
08:30 - 09:00	論壇開幕式 - 致詞及合影	主席：馮夏庭教授
09:00 - 18:00	專題演講與討論	
時間	主題	講師
09:00 - 09:30	Geo-Engineering Risk: What Is Acceptable? (地質工程風險: 什麼是可接受的)	Prof. Jean-Louis Briaud (FedIGS President)
09:30 - 10:00	Physical Modelling of Tunnelling with Forepoling. (隧道先撐管幕工法之物理模式)	Prof. Neil Taylor (ISSMGE Secretary General)
10:00 - 10:10	休息	
10:10 - 10:40	Anisotropy in Rock Masses and Hydraulic Properties. (岩體異向性及其水力性質)	Dr. Eda Quadros (ISRM President) (由 Dr. Nick Barton 代為宣讀論文)
10:40 - 11:10	Rock Mechanics for Rock Engineering at Great Depth. (大深度岩石工程之岩石力學)	馮夏庭教授 (ISRM Past President)
11:10 - 11:40	In Situ Stress Field Estimation for the Design Underground Structures. 設計地下結構物之現地應力場量測	Dr. Luis Lamas (ISRM Secretary General)
12:00 - 13:30	午休	
13:30 - 14:00	Lessons Learned from the Oso Landslides, March 22, 2014, Washington, USA. (2014年3月22日美國華盛頓州奧索邊坡滑動災害之經驗教訓)	Prof. Scott Burns (IAEG President)
14:00 - 14:30	SMRM Model for Jointed Rock Mass. (節理岩體之統計岩體力學模式)	伍法權教授 (IAEG Secretary General)
14:30 - 15:00	Sustainable Development using Geosynthetics. (土工合成材料之永續發展)	Dr. Russell Jones (IGS President)
15:00 - 15:10	休息	
15:10 - 15:40	Climate Change: Implications to Geosynthetic Reinforced Soil Wall Design (氣候變遷對土工合成材料加勁擋土牆設計的啟示)	Prof. Chungsik Yoo (IGS Vice President)
15:40 - 16:10	Non-linear Shear Strength for Rock, Rock Joints, Rockfill and Interfaces. (岩石、節理、土石壩與接合面之非線性剪力強度)	Dr. Nick Barton
16:10 - 16:40	Assessment of Subsidence Hazard in Abandoned Mine Areas in Korea. (韓國廢棄礦區之沉陷災害評估)	Prof. Seokwon Jeon (ISRM Vice-President for Asia)
16:40 - 18:00	討論	



圖 1：2015 國際地質工程論壇合影

### (一) 論壇專題講座

論壇由 Jean-Louis Briaud 教授以探討地質工程中災害風險而揭開序幕，Jean-Louis Briaud 教授為加拿大渥太華大學博士，任教於德州 A&M 大學土木工程系教授，專長領域為大地工程、岩土與結構工程等，致力於基礎工程、橋梁抗沖刷、土壤侵蝕、擋土牆、野外試驗、土力學和土壤膨脹-收縮等方面的研究，研究與實務經驗很豐富。Jean-Louis Briaud 教授探討地質工程中可接受的災害風險(圖 2)，將人類每天可能面臨的風險，與土木或地質工程中因失敗而導致的災害相互比較，探討地質工程中可接受風險的概念。

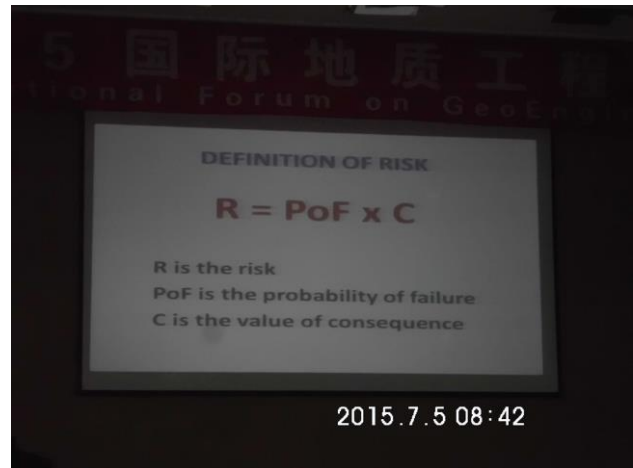


圖 2：Jean-Louis Briaud 教授專題演講

Neil Taylor 教授為劍橋大學工學博士，任教於倫敦城市大學，致力於地質工程之物理模型試驗研究，於 1989 年安裝了 Acutronic 661 地工離心機，並一直積極利用離心機進行變形監測機制的相關研究項目，率先將離心機的數字圖像分析技術應用於隧道地面運動的變形監測，已成為世界各地的離心機設備中使用的標準技術。此次論壇 Neil Taylor 教授發表隧道管棚支護工法與其物理模式(圖 3)，探討在塑性變形機制下，管棚支護工法及其最佳化配置方式對隧



道穩定性的影響。



圖 3：Neil Taylor 教授專題演講

Eda Quadros 博士為新上任的 ISRM 主席，為聖保羅大學工程科學博士，專長為土力學、岩石力學及試驗、與基礎工程等領域，她曾在岩石力學與水力學實驗室從事實驗設備、方法和評估技術的開發，並應用於現場研究，包括節理岩體的異向性滲透張量評估方法應用於水利大壩工程；2003 至 2011 年，她擔任巴西石油公司經理，曾進行在鹽岩的長期高溫蠕變和空心圓柱測試等一些先進的研究和設備開發。從 2011 年至今，Eda Quadros 博士是巴西聖保羅的一間巴西諮詢公司(BGTech)擔任土壤和岩石工程的技術總監；Eda Quadros 博士亦曾在台灣、大陸、香港、澳洲、與新加坡等地教授” Engineering and Flow in Rock Masses(岩石之工程與水流)” 短期課程。此次論壇，Eda Quadros 博士探討岩體異向性及其水力特性(圖 4)，說明岩體因其不同的地質成因與構造活動等因素，多半呈現的是異向性(不連續和非均勻介質的典型特徵)，因此均勻及等向性的線性流動行為的假設很少適用於模擬真實岩體的液壓行為。



取自 ISRM 網站(<https://www.isrm.net/>)

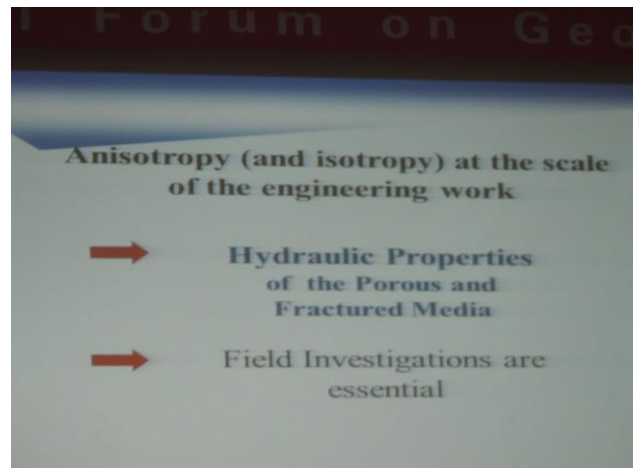


圖 4：Eda Quadros 博士專題演講

馮夏庭教授為剛卸任的 ISRM 主席，為東北大學博士，專長為岩土工程、智能岩石力學與計算岩土力學。1998 至今任職於中國大陸中科院武漢岩土力學研究所，及岩土力學與工程國家重點實驗室主任，亦為東北大學深部金屬礦山安全開採重點實驗室主任。馮夏庭教授除

了一直在岩土工程(包括滑坡)的安全分析、開挖與變形控制的最佳化、岩石力學非線性動力學分析方法、大型地下工程開挖與長期穩定的工程方法等岩石工程領域持續開發新知識與新技術外，對放射性廢棄物最終處置的岩石力學問題亦多有研究，如岩石在溫度－水流－應力－化學(THMC)耦合過程的試驗、模型與數值分析方法；水化學腐蝕下岩石損傷局部過程與時間效應研究。

此次論壇馮夏庭教授主要探討地質工程中深開挖工程遇到的岩爆(rockburst)問題、數值模擬及預測模式之研究(圖 5)，岩爆是由於岩石累積的應變能大於岩石在開挖破壞過程中所消耗的能量時，多餘的能量導致岩石碎片從岩體中剝離，是硬岩環境進行深開挖(如深層隧道開挖)可能遇到之災害，中國大陸目前在錦屏山水力電廠的隧道工程，及紅透山銅礦場的深層隧道開挖過程皆遇到此一岩爆的問題。馮夏庭教授透過現地調查、實驗與數值模擬與計算等步驟，探討大深度開挖工程之岩石力學，指出岩性是決定岩石是否會發生岩爆的內在因素，並藉由實驗室內岩石力學試驗之單軸抗壓強度、抗拉強度、應力-應變曲線、加載與卸載曲線等試驗結果、及利用脆性指數、應變能儲存指數、岩爆能量比等方法以評估發生岩爆的可能性，是一種評估發生岩爆可能性的有效方法。



圖 5：馮夏庭教授專題演講

ISRM 秘書長 Luis Lamas 博士為英國倫敦大學博士，主要研究方向是岩體、隧道及岩石壩基等的流體力學行為。1981 年，Luis Lamas 博士加入葡萄牙的土木工程國家實驗室(LNEC)之地下設施建設部門，多次參與 ISRM 之會議，並出版多本岩土工程和土木工程等領域之刊物。本次論壇 Luis Lamas 博士探討地下結構物設計之現地應力場量測(圖 6)，說明整合現有的套鑽實驗，水力破裂法和平板千斤頂的方法，並利用岩體和地下開挖結構物的數值模型等，說明地下結構物之現地應力場量測及實例介紹。

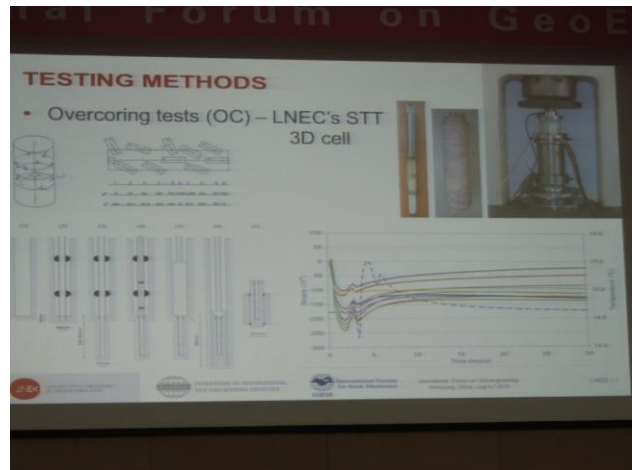


圖 6：Luis Lamas 博士專題演講

IAEG 主席 Scott Burns 教授為科羅拉多大學地質學博士，任教於波特蘭州立大學，主要研究領域為環境與工程地質、地貌、土壤學和第四紀地質學，曾在俄勒岡州從事邊坡滑動和土地利用、邊坡穩定性、地震災害測繪、土壤中氬氣、重金屬及微量元素的分布等研究項目。Scott Burns 教授過去曾擔任俄勒岡州之土壤科學學會及工程地質學會總裁、美國地質學會的工程地質師主席、與北美工程地質學家國際協會副總裁等，教學與實務經驗皆豐富，本次論壇 Scott Burns 教授探討發生於美國華盛頓州之奧索邊坡滑動災害經驗回饋(圖 7)，2014 年 3 月 22 日，一個  $8 \times 10^6 \text{ m}^3$  體積的滑坡以 100 Km/hr 的速度滑落至下方的 Stillaguamish 河附近的奧索村，造成 41 人死亡，2 人失蹤，45 間房屋被摧毀，財產損失 1000 萬美元，而後續救援與清理亦花費 3200 萬美元，為美國過去 200 年歷史上的第五個最嚴重的滑坡災害。地質學家發現此 180 m 高滑坡為懸崖冰碛及其沉積物，分別在 1949 年，1951 年，1967 年，1988 年，及 2006 年已發現有邊坡滑動的潛勢，但該訊息未傳達到土地利用規劃者和最終生活在那裡的居民。此一邊坡滑動的災害經驗顯示，地方上的政府與居民需要共同建立與描繪邊坡滑動敏感性的地圖，做為地質災害預防之需。

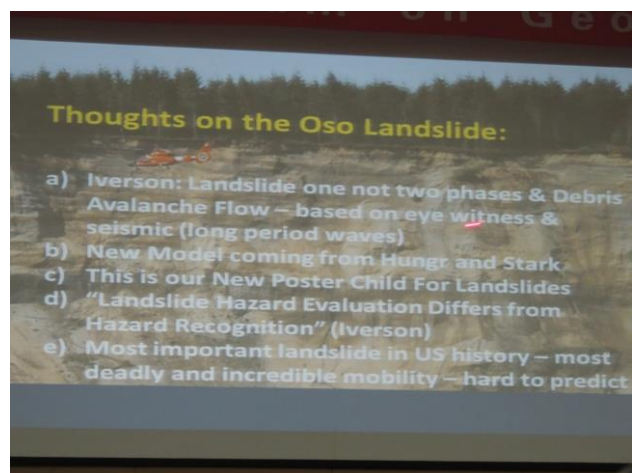


圖 7：Scott Burns 教授專題演講

ISRM 亞洲分會副主席 Seokwon Jeon 教授為加州亞利桑那大學岩土工程碩士及採礦和地質工程博士，現任教於韓國首爾大學能源系統工程系，主要研究領域為岩石斷裂力學、隧道設



計和穩定性分析、機械化掘進、控制爆破和拆除等。本次論壇 Seokwon Jeon 教授探討韓國廢棄礦區沉陷災害之經驗回饋(圖 8)，韓國在 1980 年代以來陸續有 300 個煤礦場關閉，廢棄煤礦場卻產生很多不同類型的危險，包括土壤污染與地面沉陷等問題。韓國方面成立礦山復墾公司(Mine Reclamation Corporation; MIRECO)來解決上述問題，然而地面沉陷卻是韓國敏感且迫切需要處理的問題，因為過去煤礦開採過程通常採取急劇的鑽炸與挖掘工法，卻於 2010 年至 2012 年短短 3 年間出現 120 個地面沉陷的案例，因此韓國刻正積極在研究如何防範廢棄礦區地面沉陷的新技術。

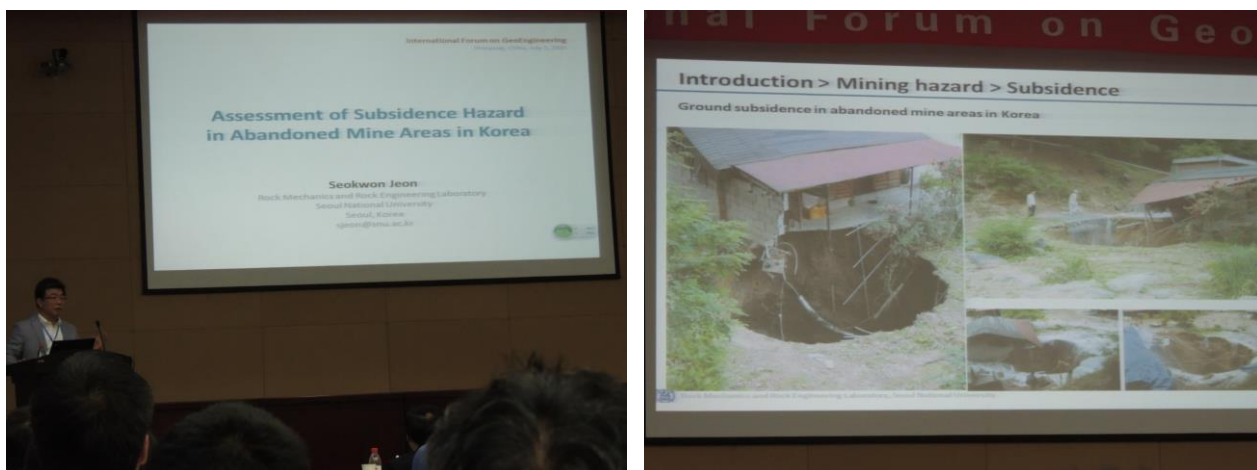


圖 8：Seokwon Jeon 教授專題演講

IGS 主席 Russell Jones 博士現服務於 Golder Associates 公司，此次論壇 Russell Jones 博士指出在土木工程中，使用地工合成材料除了可降低進口材料的成本，和傳統使用土壤、混凝土或鋼等材料的工程相比，可提高經濟利益，亦能更有效地利用資源及發揮環境效益(圖 9)。Russell Jones 博士舉出一些使用地工合成材料可以減少碳足跡的案例，從歐洲的角度上來看並能實現永續發展的精神。



圖 9：Russell Jones 博士專題演講

IGS 副主席 Chungsik Yoo 教授為美國賓州州立大學博士，現擔任韓國成均館大學土木與建築學院的講座教授，亦為韓國地工合成材料學會主席，主要研究領域為隧道工程、地工合

成材料、擋土牆結構數值模擬及現場測試。此次論壇 Chungsik Yoo 教授指出全球暖化已成為一個問題，人類應該共同尋求解決方案。朝鮮半島的地表溫度在過去 94 年以來平均上升了 1.5 度，而溫度上升的直接後果是年降雨量的增加，造成很多地工合成材料加勁擋土牆的失敗案例。為了因應全球暖化帶來暴雨之極端氣候，Chungsik Yoo 教授提出以應力-孔隙水壓力的耦合分析(stress-pore pressure coupled analysis)方法於模擬降雨和地工合成材料加勁擋土牆之分析設計(圖 10)。



圖 10：Chungsik Yoo 教授專題演講

IAEG 主席秘書長伍法權教授為中國科學院水文地質與工程地質博士，目前為中國科學院地質與地球物理所地質工程中心主任，致力於「統計岩體力學」的理論發展，著有「統計岩體力學原理」一書，在國際學術期刊上發表了 40 餘篇論文。此次論壇伍法權教授提出新的分析技術「節理岩體之統計岩體力學模式」(圖 11)，根據統計結構和不連續性的斷裂力學行為的岩體的統計力學模型(SMRM)，該模型從能量累加的原則開始，即岩體中單位的應變能密度(strain energy density)是從連續岩石構造和不連續的裂隙網路中的應變能密度總和，而其應力-應變模型可由能量密度方程式而來，藉由 SMRM 模型可以很容易地獲得岩體的楊氏模數(Young's modulus)及柏松比(Poisson's ratio)的參數，並可以了解岩體變形的特徵，如弱化、異向性、張力/壓縮比等。SMRM 模型亦即依據岩體結構的現地量測數據，建立岩體結構機率參數模型，在結構模型基礎上引入斷裂力學與連續介質力學理論，建立岩體的應力-應變模型、強度與破壞機率模型，以及滲流流體力學模型等，這是近 20 多年來統計岩體力學對岩體工程地質力學理論發展所做的工作。

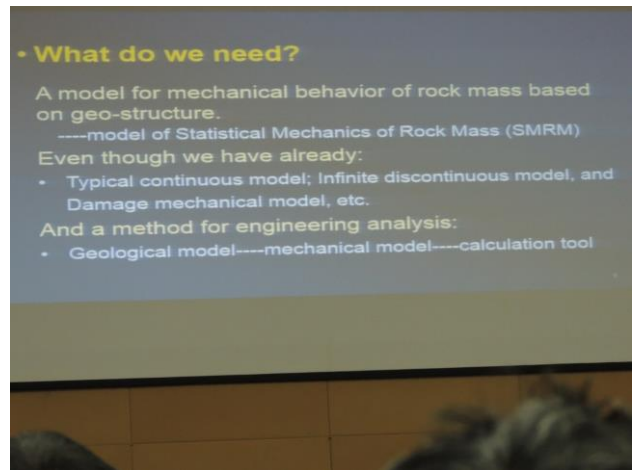


圖 11：伍法權教授專題演講

國際岩石力學學會最高成就獎(繆勒獎)得主 Nick Barton 教授為倫敦帝國學院博士，專長在於岩體剪力強度與岩體邊坡穩定研究，曾為挪威岩土工程研究所主任，後來擔任技術顧問一職，Nick Barton 教授在全世界 35 個國家從事岩土工作已經有 40 年，主要是公路、鐵路和地鐵項目的相關經驗，也參與隧道、岩石邊坡穩定、壩體及壩基穩定、和放射性廢棄物處置的研究，並於 2000 年時，在挪威創辦了自己的 Nick Barton & Associates 諮詢公司。此次論壇 Nick Barton 教授因應岩石的複雜特性，提出新的分析技術：岩石節理(rock joint)、堆石(rockfill)與接合面之非線性剪力強度分析(圖 12)，指出雖然完整岩石的破壞行為在理論上常以線性莫爾-庫侖剪力強度包絡線(linear mohr-coulomb shear strength envelopes)來表示，然而如果採取在拘限應力的寬範圍外時，實際的真實行為是非線性，為什麼這現象對岩石節理和堆石如此重要呢?因為當岩石節理和堆石的真實應力點已經接近(或超越)其抗壓強度，其破壞曲線將呈現非線性。

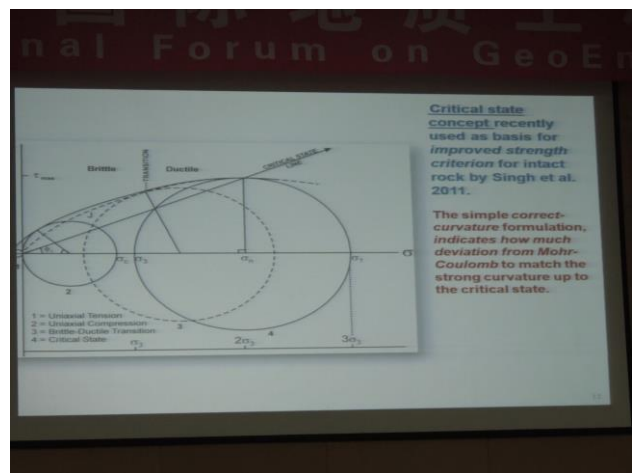


圖 12：Nick Barton 教授專題演講



## (二) 岩石力學實驗室參訪

深部金屬礦山安全開採重點實驗室主要針對深地層開挖過程中岩爆、高溫等災害之預測與防治，發展岩石工程中岩體穩定性、災害控制及安全開挖等技術之研究，參訪該實驗室目的在於了解硬岩真三軸試驗系統、硬岩三軸潛變試驗機、及多場耦合三軸潛變試驗儀等試驗設備、功能與研究方向，由東北大學深部金屬礦山安全開採重點實驗室主任馮夏庭教授及資源與土木工程學院張希巍教授解說。

由於進入深層地下開採金屬礦物等資源時，因現地岩石應力較高的問題，常常引致岩爆等工程災害，因此為研究在開挖卸載過程中真三軸應力路徑對岩石力學性能的影響，而建立硬岩真三軸試驗平台系統(Hard Rock True Triaxial Apparatus)(圖 13)，主要應用於以下研究項目：

1. 深部地下岩體在真三軸條件下的力學特性：強度和變形、破壞模式和破壞角；
2. 建立硬岩開挖卸載條件下的強度準則，如卸載路徑、卸載速度對岩石強度的影響；
3. 研究開挖過程中，硬岩的脆性破壞特性、以及脆性變形對岩爆的影響；
4. 透過室內真三軸試驗的破壞模式，以判別現地最大水平應力的方向。

而東北大學硬岩真三軸試驗平台系統則具備以下四點關鍵技術突破(圖 14)：

1. 試樣品的幾何中心恆定：採用正交浮動框架結構設計；
2. 解決尖峰值後的問題：採用高剛度的加載框架和閉環伺服器逆推控制技術；
3. 體積應變量測：採用內置耐高壓感測器，解決較小主應變量測的困難；
4. 解決表面摩擦及應力空白角的問題：透過減少摩擦和和滑動壓塊的設計。

而國際間歷年來針對硬岩真三軸試驗研究分別有：日本東京大學於 1967 年針對 1.5 cm×1.5 cm×3.0 cm 的硬岩試體；美國威斯康辛大學於 2001 年針對 1.9 cm×1.9 cm×3.8 cm 的硬岩試體；及大陸東北大學於 2014 年針對 5.0 cm×5.0 cm×10.0 cm 的硬岩試體等，進行抗壓強度試驗，並分析其最大最小主應力差值( $\sigma_1 - \sigma_3$ )與應變值的關係曲線(圖 15)及測試後的試體樣品破壞形式(圖 16)。



圖 13：硬岩真三軸試驗系統

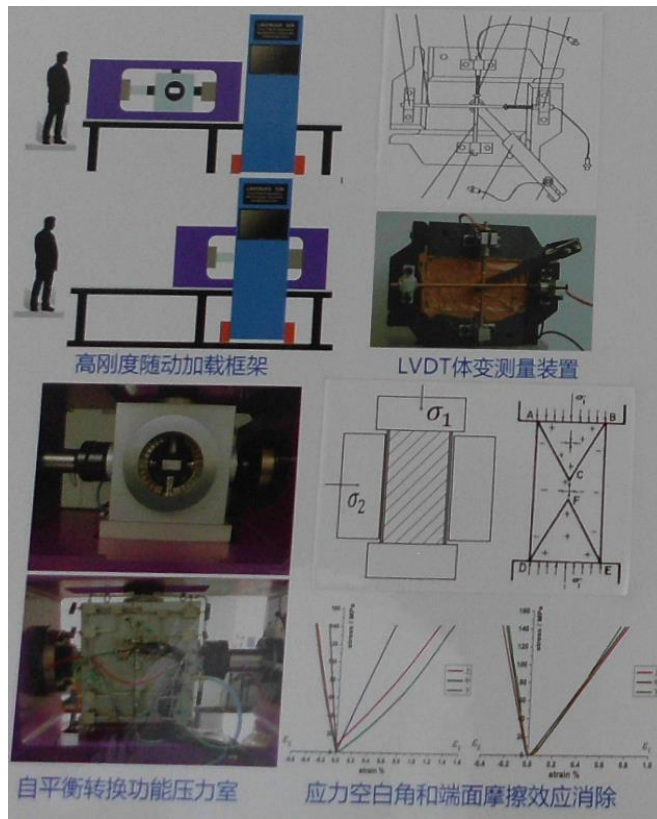


圖 14：東北大學硬岩真三軸試驗系統關鍵技術

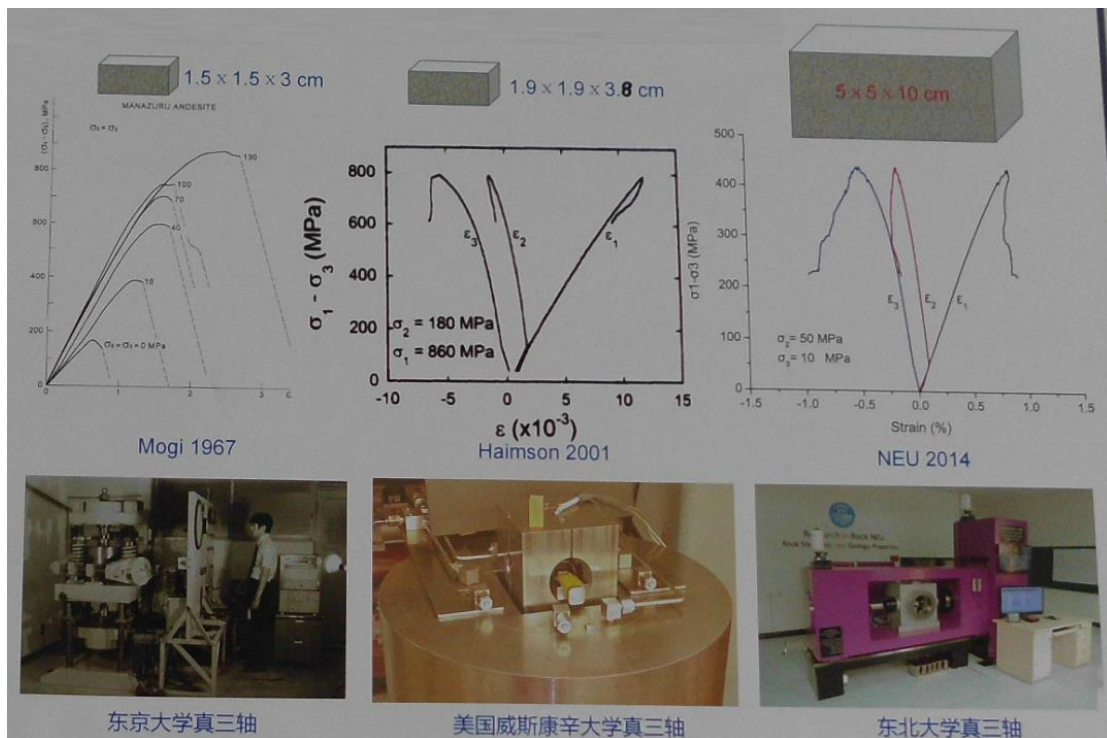


圖 15：國際間硬岩真三軸試驗研究成果





圖 16：測試後的試體樣品破壞形式

隨著開採工程、水電站地下廠房等地下工程開挖深度的逐漸加深，地下圍岩在開挖卸載和持續複雜荷載的作用下，易發生隨時間擴展的漸進式破壞，即圍岩失效變形與破壞，因此岩石力學性質的時間效應是影響深部地下工程的關鍵問題(圖 17)。

放射性廢棄物具有高強度的放射性，目前深地層處置被認為是放射性廢棄物有效的最終處置方式。放射性廢棄物處置場深度達數百公尺，周圍圍岩處於溫度場、應力場、滲流場和化學場共同作用的環境中，多場耦合下的處置場周圍圍岩的力學性質將是影響處置場長期安全的關鍵問題。

東北大學之多場耦合岩石三軸潛變儀(Rock Triaxial Apparatus in Multi-Field Coupling)試驗系統(圖 18 與圖 19)應用高精度的位移感測器，以準確測試緻密岩石在多物理場作用下的微小應變，其系統具備有軸向位移感測器誤差值小於 1%的精度範圍。其系統主要組成部分有：油壓控制系統、偏應力加載系統、圍壓加載系統、孔隙水壓力加載系統、化學溶液注入系統、溫度施加系統、試驗資料處理系統等。而其系統加載方式可採用以下 3 種方式：

1. 應力控制、位移控制等兩種偏應力加載控制方式；
2. 定流量、定壓力等兩種氣體注入方式；
3. 定流量、定壓力等兩種孔隙水注入方式。

多場耦合岩石三軸潛變儀具有最大軸向加載 600kN、最大圍壓 60MPa、最大注水壓力 60MPa、最高溫度 90°C 等特性。主要應用於以下 4 個方面：

1. 溫度場、化學場、應力場、滲流場作用下完整及損壞岩石的潛變行為；
2. 溫度場、化學場、應力場、滲流場作用下岩石裂隙演化；
3. 溫度場、化學場、應力場、滲流場作用下岩石滲透性能試驗；
4. 不同加載路徑下岩石潛變行為。

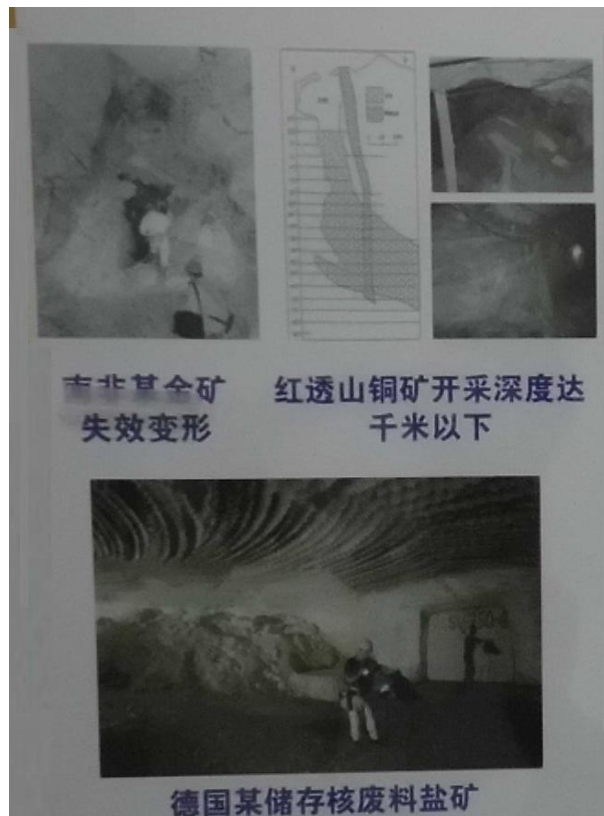


圖 17：地下開挖工程之圍岩失效變形與破壞

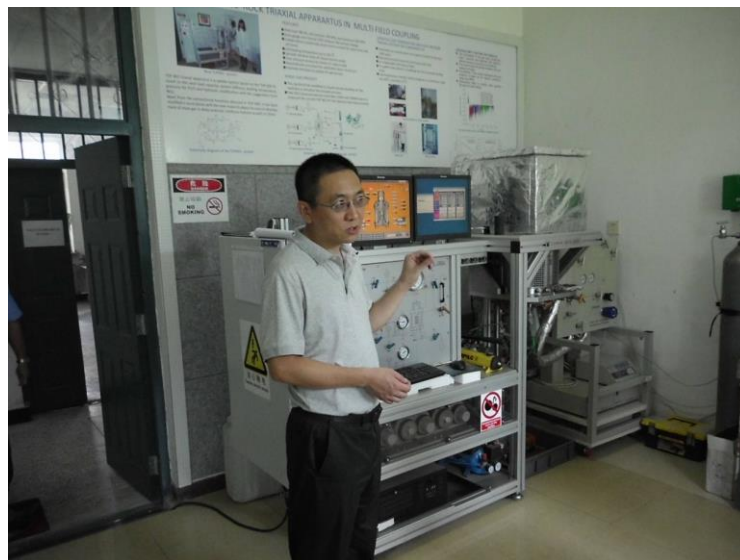


圖 18：多場耦合岩石三軸潛變儀  
(解說者：張希巍教授)

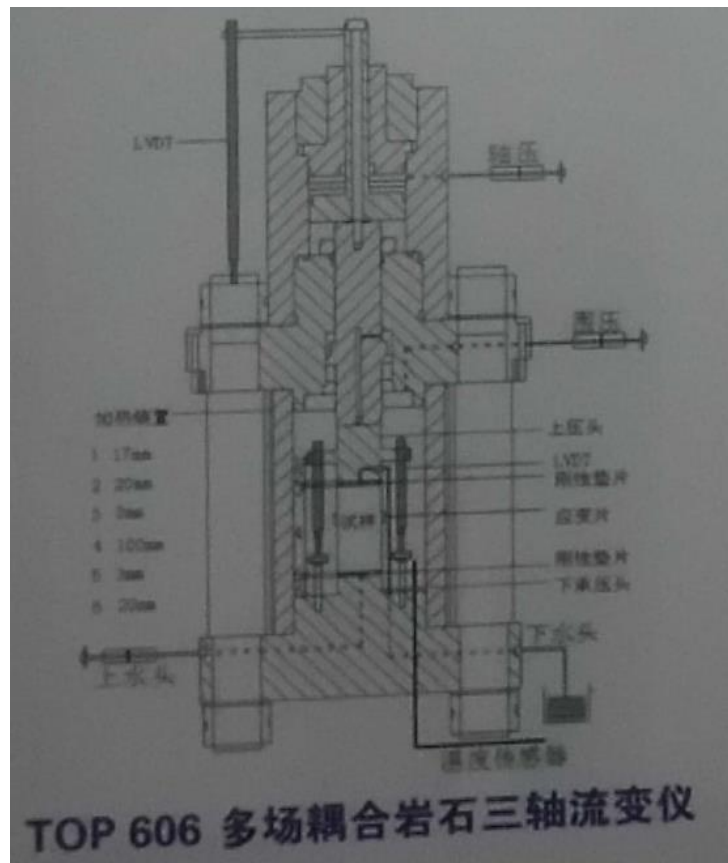


圖 19：多場耦合岩石三軸潛變儀設計  
 (“Creep”大陸翻譯為流變，台灣翻譯為潛變)

硬岩三軸潛變試驗系統(Creep Testing System for Hard Rock)是一台用於研究硬岩短期和長期力學行為，尤其是峰值後脆性破壞行為的三軸試驗機(圖 20 與圖 21)，其具有高剛度的加載框架和高靈敏度的伺服液壓控制系統，且集成了常規三軸和潛變試驗功能；該儀器具備下列特性：

1. 軸向壓力 2000 KN，圍壓 70MPa；
2. 高剛度的門框式加載框架(圖 22)：7 GN/m；
3. 獨立的閉環伺服控制系統；
4. 先進的體積應變量測系統；
5. 低摩擦球頭，可保證受力的均勻性；
6. 開放式的數據輸出軟體平台；
7. 自平衡活塞技術；
8. 符合 GB、ASTM 和 IRSM 的試驗標準。

該儀器為分析岩石於峰值後脆性變化的潛變，導入「多應變片分布式測量系統」(圖 23)，其具備以下功能特性：

1. 長柵應變片平行於岩石表面分布式測量；
2. 可準確獲得岩石峰值後變形訊號；
3. 可準確獲得裂隙初期的擴展，以實現局部裂隙產生與擴展的靜態/動態測量；
4. 岩石局部損壞演化的相關性研究；
5. 具有較高的量測精度。

硬岩三軸潛變試驗系統可進行的實驗功能如下：

1. 岩石單軸抗壓試驗；
2. 岩石常規三軸試驗；
3. 岩石三軸潛變試驗；
4. 岩石的剪切試驗。

其主要應用於：

1. 硬岩峰值後破壞行為的評估；
2. 測量岩石等向性和異向性的壓縮變形；
3. 岩石加載及卸載過程中應力路徑依賴性的研究；
4. 岩石加載破壞演化規律的研究；
5. 岩石脆性及延性轉換試驗研究、轉換特徵點的識別；
6. 硬岩潛變行為的研究。

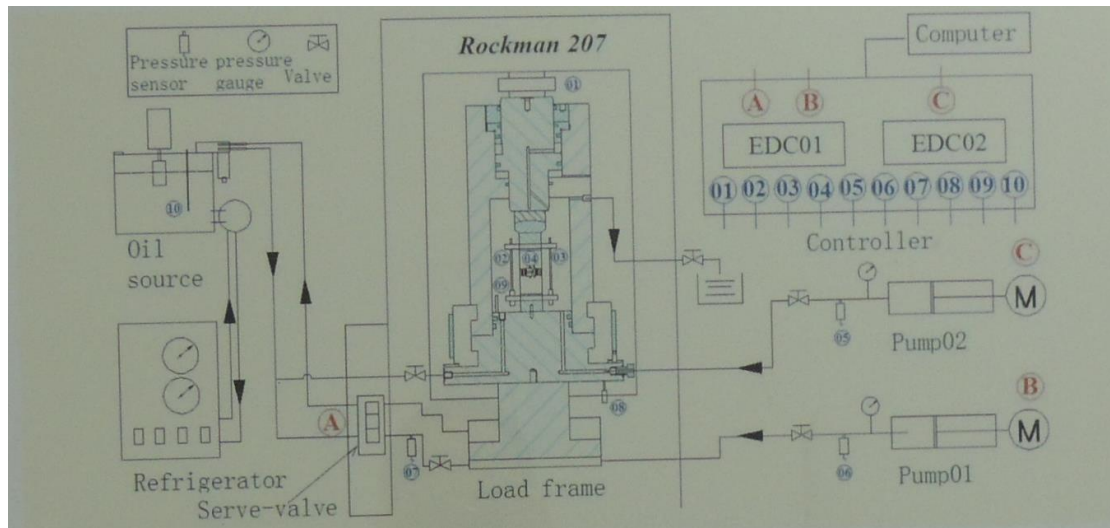


圖 20：硬岩三軸潛變試驗系統設計圖

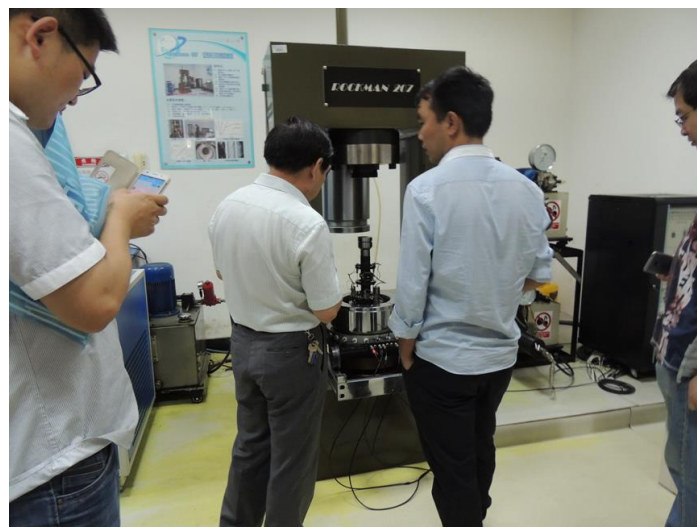


圖 21：硬岩三軸潛變試驗系統





圖 22：高剛度的門框式加載框架

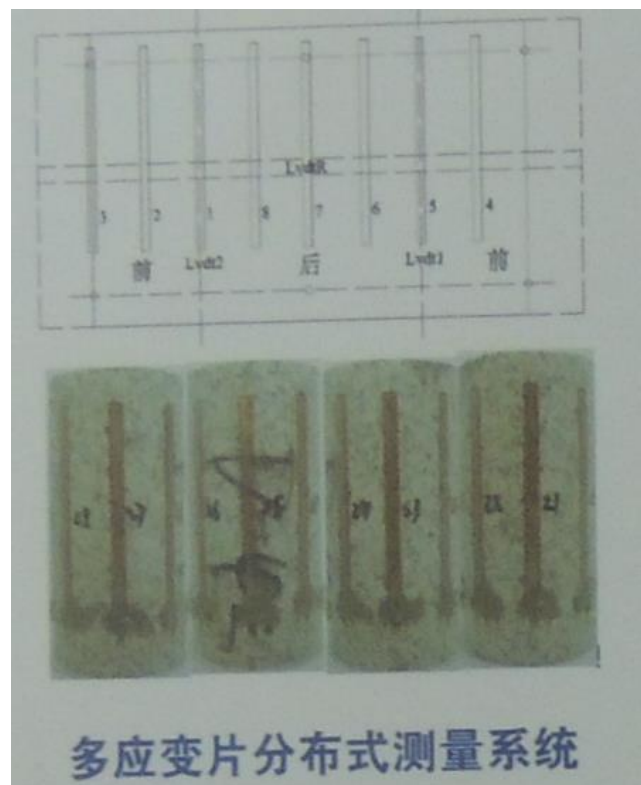


圖 23：多應變片分布式測量系統

### (三) 自然地質與地質博物館參訪

自然地質參訪內容則主要了解本溪水洞的地質特性，本溪水洞為數百萬年前形成的大型充水溶洞，具有地下暗河，其地質以喀斯特地質地貌為主，洞內常見地下水滲出(圖 24)，以致形成多種的鐘乳石之樣貌；本溪地質博物館則陳列多種岩石標本如花崗岩、花崗斑岩(圖 25)、花崗片麻岩、玄武岩、頁岩等之地質知識(圖 26)，具有普及地質科學教育的功能。



圖 24：本溪水洞自然地質參訪

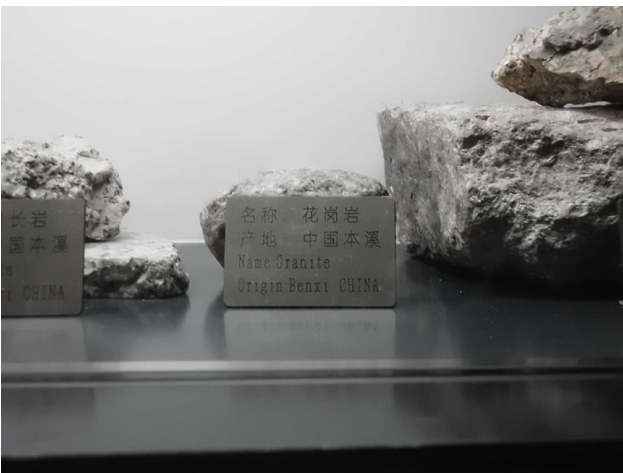


圖 25：地質博物館花崗岩與花崗斑岩

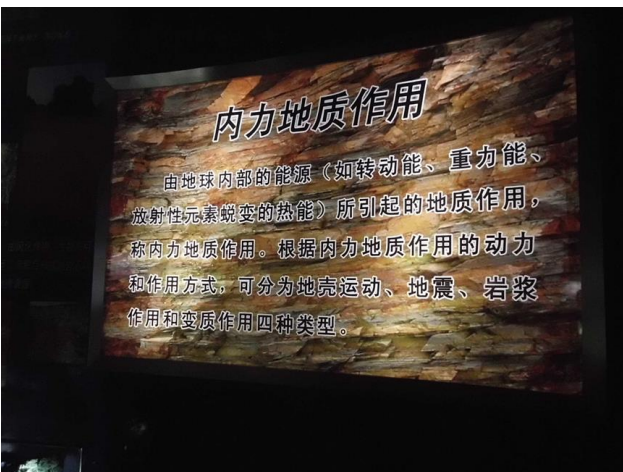


圖 26：地質科普教育

#### (四) 紅透山銅礦場之地質與岩石力學之研究現況

馮夏庭教授亦進行紅透山銅礦場之地質與岩石力學之研究現況簡報(圖 27)，中國大陸目前約有超過 10 處深度介於 1300~2000 m 的礦場，然而陸續有些新的礦物資源被發現位於深度 1500~2000 m 的位置(圖 28)，顯示超深地層開挖工程的技術與問題將日趨被重視。紅透山銅礦場於 1999 年在深度 1100m 處之斜坡道曾發生兩次岩爆，邊壁上有大量岩石崩落，隨著近年來開挖深度逐漸加深，岩爆發生的次數越頻繁(圖 29)。馮教授等透過觀察、實驗與數值模擬，逐步了解岩爆孕育演化規律及特性、發展岩爆預測方法及動態調控方法，並於開挖過程(2013 年 11 月至 2014 年 9 月間)中針對具岩爆風險區域之圍岩逐步採取穩定支撐(圖 30)。



圖 27：紅透山銅礦場地質與岩石力學研究現況簡報



圖 28：中國大陸深層礦場及深開挖工程現況



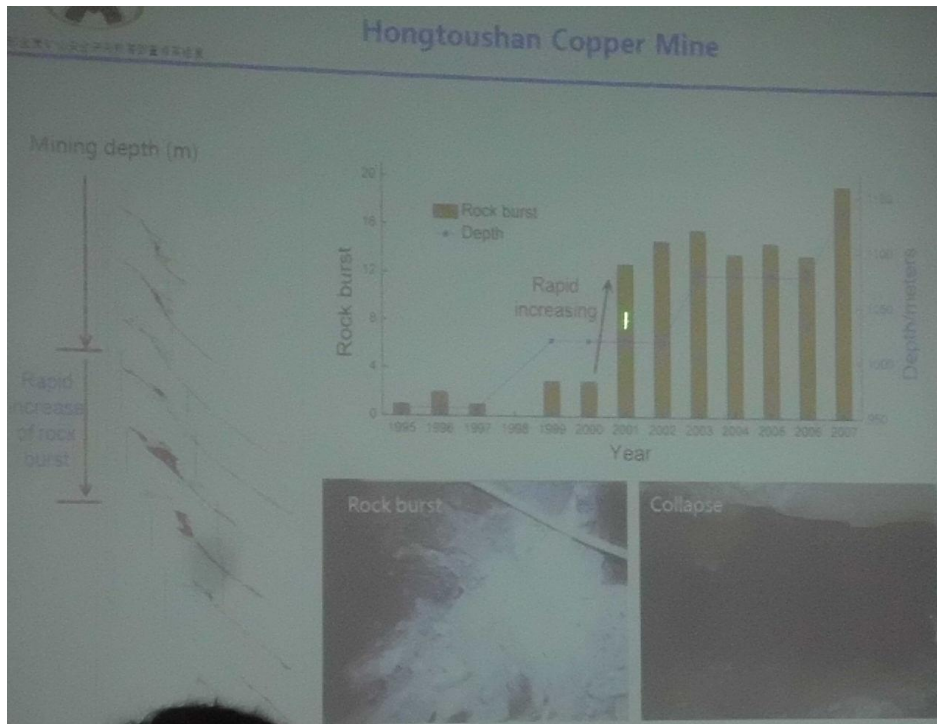


圖 29：紅透山銅礦場近期岩爆發生次數

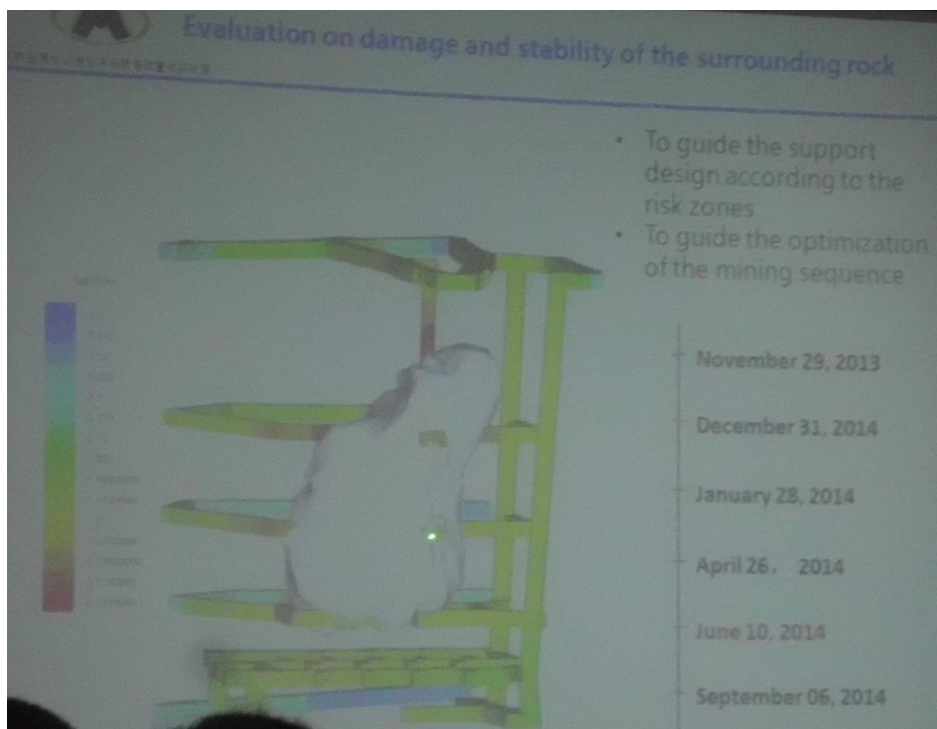


圖 30：岩爆風險區域圍岩之穩定支撐措施



### 三、心得

本次國際地質工程論壇以「地質工程、岩石力學、土壤力學與地工合成材料之新理論、新技術、新發展」為主題，由國際地質工程相關領域之學會主席、副主席、及秘書長等專家進行專題講座。專題演講中對岩石工程之岩體異向性與節理岩體的力學特性等多有新的獨到見解，及了解深部岩石工程之岩爆災害及其評估方法、預警與防護機制，並藉由目前國際上地質工程災害的案例如礦坑的崩塌、邊坡滑動、土石流等地質工程的災害，進一步將地質工程災害與風險做一關聯性探討。除了了解到工程地質、岩石與土壤力學等領域之國際最新進展和未來發展趨勢，亦了解到風險評估的重要性。由於放射性廢棄物最終處置採取深層地質處置技術，處置場位於深部岩石環境中，因此處置場的安全與否，有很大的因素取決於深部岩石環境的好壞，因此「岩石力學」與「岩石工程」是深層地質處置之關鍵因素，在處置系統的概念設計、現地地質調查與試驗、工程設計與施工、運轉、及其長期安全評估等方面，均須考量到岩石力學、岩石工程與風險評估的重要性。

為因應複雜多變的地質特性，以完成地質、岩石、與土壤工程的實踐，需藉助於很多領域的知識、理論、數值模擬能力、與工程經驗的相互融合，包括岩石力學、土力學、地質學、水文學、結構力學、材料力學、地球化學、構造運動、數值模擬、現地調查、施工工法、機械力學(開挖機具及儀器)、氣候變遷、永續發展、風險分析、法規與公共政策等，而促成上述領域的合作是為本次國際地質工程論壇的宗旨。可想而知，「放射性廢棄物最終處置」是未來重大的工程建設，其成敗攸關到能源使用、人類生活與環境保護等重要議題，同樣也需要國內各領域之專業知識、理論基礎、數值模擬能力、與工程經驗相互合作。

岩石力學實驗室參訪行程了解到東北大學之硬岩真三軸試驗系統、硬岩三軸潛變試驗機、及多場耦合三軸潛變試驗儀等試驗設備、功能與研究方向。由於岩石力學性質(強度和變形、破壞模式和破壞角、岩爆)與岩石變形的時間效應(潛變、脆性破壞和脆性變形)等是影響深部地下工程的關鍵因素，故藉由實驗室之硬岩真三軸試驗系統與硬岩三軸潛變試驗機進行相關試驗，以獲得深部硬岩之相關參數數值(脆性指數、應變能儲存指數、岩爆能量比等)，進而評估現地硬岩環境發生岩爆的可能性，是一種評估發生岩爆可能性的有效方法，而多場耦合三軸潛變試驗儀可以用來量測岩石在溫度場、化學場、應力場、滲流場等多場耦合作用下之潛變行為、裂隙演化與滲透性能等，與目前放射性廢棄物最終處置之關鍵技術「工程障壁系統 THMC 耦合」類似。值得一提的是，大陸東北大學仍在試驗設備的功能上持續不斷地改良、擴展及精進，並掌握一些關鍵技術，以因應複雜多變的現地岩石環境，這種精神值得學習。

「放射性廢棄物最終處置」與「礦物資源開採」兩者之間有諸多相同之處，都必須藉由深地層開挖技術。大陸方面近幾年陸續發展超深地層開挖工程技術，並將其應用於探採新的礦物資源與開挖水力發電之深地層隧道。雖然人類可以在工程技術上突破和創新，然而這些工程實例卻顯示，地質工程上的「高溫」、「岩爆」、及「崩塌」等工程風險仍不可避免。而「礦物資源開採」及其它深地層開挖工程中遇到之「高溫」、「岩爆」、及「崩塌」等問題及工程風險，都將是未來「放射性廢棄物最終處置」於建造階段可能會遇到的工程風險，為避免上述「高溫」、「岩爆」、及「崩塌」等問題及工程風險，唯有藉由地質調查、岩石力學試驗與數值分析等方式，才有可能降低此工程風險發生之可能性。

## 四、建議事項

本次參與國際地質工程論壇與岩石力學實驗室參訪之公差行程，有感於國際間各學會組織之主席、副主席及秘書長共同呼籲地質工程、岩石力學、土壤力學與地工合成材料等各領域須共同融合與合作。建議事項如下：

- (一) 放射性廢棄物最終處置是未來重大的工程建設，需要國內各領域之專業知識、理論基礎、數值模擬能力、與工程經驗相互合作，包括岩石力學、土力學、地質學、水文學、結構力學、材料力學、地球化學、構造運動、數值模擬、現地調查、施工工法、機械力學(開挖機具及儀器)、氣候變遷、永續發展、風險分析、法規與公共政策等領域，本所除目前與國內地質調查的學研單位密切合作外，建議需再尋求與氣候變遷、永續發展、風險分析、法規與公共政策等領域之學研單位合作。
- (二) 本次參訪大陸東北大學岩石力學實驗室之硬岩真三軸試驗系統、硬岩三軸潛變試驗機、及多場耦合三軸潛變試驗儀等試驗設備，其應用領域均含括放射性廢棄物最終處置之工程技術、岩石力學、與多場耦合等試驗，建議本所相關單位可以汲取其成功經驗，尋求合作與技術交流機會。
- (三) 大陸方面近幾年陸續發展超深地層開挖工程技術，然而仍不可避免會遇到地質工程上的「高溫」、「岩爆」、及「崩塌」等工程風險。這些都將是未來「放射性廢棄物最終處置」於建造階段可能會遇到的工程風險，甚至會影響到長期安全評估，建議本所相關單位可以多方面涉略大陸超深地層開挖之工程技術、災害風險、評估方法、預警與防護機制等案例，其經驗可以回饋於未來放射性廢棄物最終處置的發展。