

出國報告（出國類別：其他）

赴北海道大學參訪及參加 8th ARMS 出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：吳元傑 副研究員
林威廷 副工程師

派赴國家：日本

出國期間：103 年 10 月 13 日~103 年 10 月 18 日

報告日期：103 年 11 月 4 日

摘要

地盤反應分析研究隨著地震工程數十年的發展與革新，已於法規中明文訂定，包括美國 NRC 的 RG 1.208、NUREG-0800 Sec. 2.5.2 及福島事件後的管制案件 NTTF 2.1，因此成為近期核能電廠地震再評估之重要工作。但對於深層地層的地震動問題，仍有諸多技術需要發展，且不確定性評估方法亦須探討，此方面在針對 NTTF 2.1 管制案而衍生的 EPRI-1025287，亦有不少篇幅對執行方法加以討論。依照計畫要求，應多加蒐集國際技術進展，以便反應於地盤反應分析工作項目的成果之中，故利用此次第八屆亞洲岩石力學研討會，前往蒐集有關岩石地震工程與動態特性研究資料，並前往北海道大學參訪，了解在混凝土地震工程補強技術及長期耐久性評估研究發展，以作為後續研究規劃、並擴展可能的合作研究對象。

本次於研討會期間蒐集到目前岩石力學研究在地盤反應分析的方法文獻，可供計畫執行時參考採用；而此次會議亦對岩石參數的調查方法發表多種研究成果，對於計畫執行的參數不確定度評估，提供後續執行時不同的思考協助模型建立。另外，本會議亦提出諸多隧道開挖、核廢料地質處置、與二氧化碳氣體於岩層封存的研究，可供本所其他計畫參考。本次參訪北海道大學，獲得評估混凝土結構長期性能之研究方法，亦對後續核能安全研究可提供借鏡。

目 錄

頁次

摘 要.....	i
一、目 的.....	1
二、過 程.....	1
三、心 得.....	24
四、建 議 事 項.....	28
五、附 錄.....	29

圖目錄

頁次

圖一 札幌電力公司參展看板.....	2
圖二 J-Power 日本能源開發公司參展看板.....	3
圖三 含斷層之岩石錯動模擬.....	4
圖四 含斷層之岩石錯動震波觀測設備與試體尺寸.....	4
圖五 阪神地震時明挖覆蓋隧道內部受震塌陷照片.....	5
圖六 阪神地震時明挖覆蓋隧道上方地表下陷照片.....	5
圖七 含裂隙岩石反覆載重試驗設備.....	6
圖八 不同材質之含裂隙試體遲滯迴圈試驗結果.....	6
圖九 現地應力轉換為 μ_m 結果.....	7
圖十 汶川地震對現地應力的影響.....	8
圖十一 阪神地震前後之現地應力觀測變化.....	8
圖十一 日本岩手縣釜石市的岩盤應變量測結果圖.....	9
圖十二 採用地工離心機進行軟弱岩體抗拉試驗設計圖.....	10
圖十三 採用地工離心機之岩石崩塌試驗與數值模擬.....	10
圖十四 採用地工離心機進行 1/30 縮尺廢棄罐 THM 模擬試驗.....	11
圖十五 基盤調查與評估流程圖.....	12
圖十六 GPR 的分析結果 3D 圖像顯示圖.....	12
圖十七 錦屏 II 水電站工程隧道開挖之工程問題.....	13
圖十八 新式岩錨設計圖.....	14
圖十九 現地試驗佈置圖.....	15
圖二十 CG01 孔之現地水力試驗結果.....	15
圖二十一 進行岩石高壓氣體滲透試驗之三軸室配置圖.....	17
圖二十二 日本 Nagaoka 二氧化碳封存示範計畫.....	17
圖二十三 二氧化碳於岩層中封存之位置示意圖.....	17
圖二十四 與北海道大學 Dr. Justin Shresha 之合照.....	18
圖二十五 FRP 黏貼特性試體.....	19
圖二十六 修補材料黏結測試試體.....	20
圖二十七 修補材料抗剪力試驗夾具.....	21
圖二十八 凍融模擬試驗機.....	21
圖二十九 動態荷重與疲勞試驗機與其試體.....	22
圖三十 靜態萬能載重試驗機.....	22
圖三十一 鹽水自然滲透試驗裝置.....	23
圖三十二 RC 牆面外牆修補後失效之案例圖.....	26

一、目的

目前地震危害度再評估計畫工作區分為兩大範圍：地震危害度、地盤反應分析，最終透過法規流程產生廠房之地震動反應譜，提供土壤結構互制分析所用，以及依照整廠評估方法篩選流程，決定後續工作應採用地震風險評估(SPRA)、或是地震餘裕評估(SMA)。本次公差目的，主要在於岩石力學之新近技術與研究成果蒐集，以便了解對於地震危害度與地盤反應分析之影響，以及在高放處置計畫的應用，並與國際同業交流，針對議題如下：

- (1)深層地盤受震反應之研究方法。
- (2)岩石特性調查與廠址參數擬定技術及不確定度評估。
- (3)隧道受震反應與工程問題處理技術。
- (4)混凝土結構之長期土壤結構互制行為研究方法。

二、過程

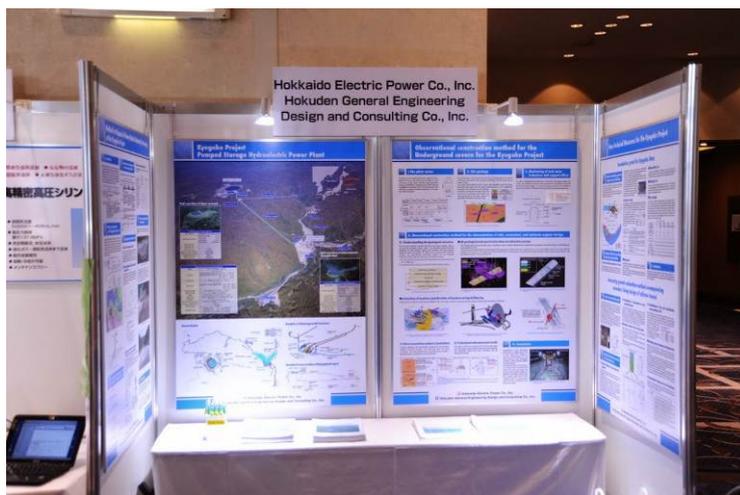
本次赴日本札幌公差從 103 年 10 月 13 日到 10 月 18 日共計 6 天，此行第一個行程是赴札幌市參加日本岩石力學學會(Japanese Committee for Rock Mechanics, JCRM) 與日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)舉辦的 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 8)討論會，會議期間參與大會研討活動並聆聽此領域專家的 keynote Lectures，藉此了解國外對於深層岩盤的地震反應評估技術與經驗，以及最新地震危害度研究，並蒐集最新的岩石動力學技術與最新應用科技，拓展研究深度與提升國際同業審查應對能力，並協助本所其他如最終處置計畫、電廠結構安全評估等提供相關資訊。此外，第二行程是赴北海道大學工學院永續環境政策與工程所的工程維護系統實驗室參訪，拜會並參觀該實驗室的相關試驗設備與了解其研究方向，此行也進行計畫研究內容交流，建立後續協同合作之機會，拓展研究深度與提升國際同業審查應對能力。本次赴日本公差之行程及工作日誌如表 1 所示，細部行程分述如下各節內容。

表 1 日本公差行程及工作日誌

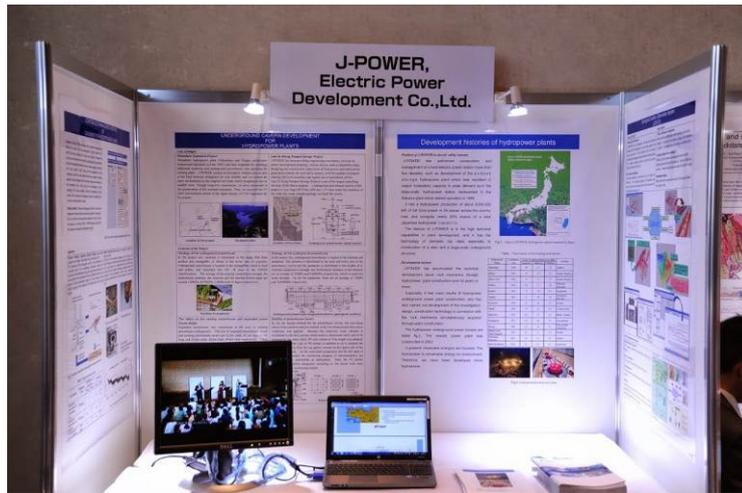
日期	行程	公差地點	工作內容
103.10.13 (一)	台北→日本札幌市	札幌市	去程
103.10.14 (二) ~ 103.10.16 (四)		札幌市	參與 ARMS8 國際研討會
103.10.17 (五)		札幌市	赴北海道大學參訪
103.10.18 (六)	日本札幌市→台北	札幌市	返程

(一)參加第八屆亞洲岩石力學研討會

亞洲岩石力學研討會每隔兩年召開一次，本次會議地點為日本札幌，共有來自台灣、韓國、日本、美國、中國、印度等 35 國共計 600 餘人參加，會議議程如附錄一，包括 14 個主題，369 篇論文發表。本次會議的研討重點放在岩石力學的全球問題：自然災害、環境與能源，藉由岩石力學學術界與岩石工程產業界各領域的交流，並提出與發表最新的岩石力學試驗方案供產學界使用，議程主題分類如附件一。此次討論會除論文發表會，亦有包括日本電力工業研究中心、札幌電力公司(詳圖一)、J-Power 日本能源開發公司(詳圖二)等計 22 家相關工業界前往參展。



圖一 札幌電力公司參展看板



圖二 J-Power 日本能源開發公司參展看板

此次討論會共分成口頭發表與海報發表兩類，其分組討論主題分成四大領域為：

- (1) 地質災害之預防：包含地震與岩石動力學、風險與災害管理、防災、邊坡穩定性；
- (2) 環境議題：包含全球暖化、二氧化碳的捕獲與封存技術、放射性廢棄物處置、THMC 耦合效應；
- (3) 能源議題：包含採礦工程、石油工程、地熱發電、油氣儲存工程；
- (4) 岩石力學新技術與基礎工程領域：包含岩石特性與廠址調查、地球物理探勘與測試方法、隧道與地下空間、維護與生命週期成本、現場監測等議題。

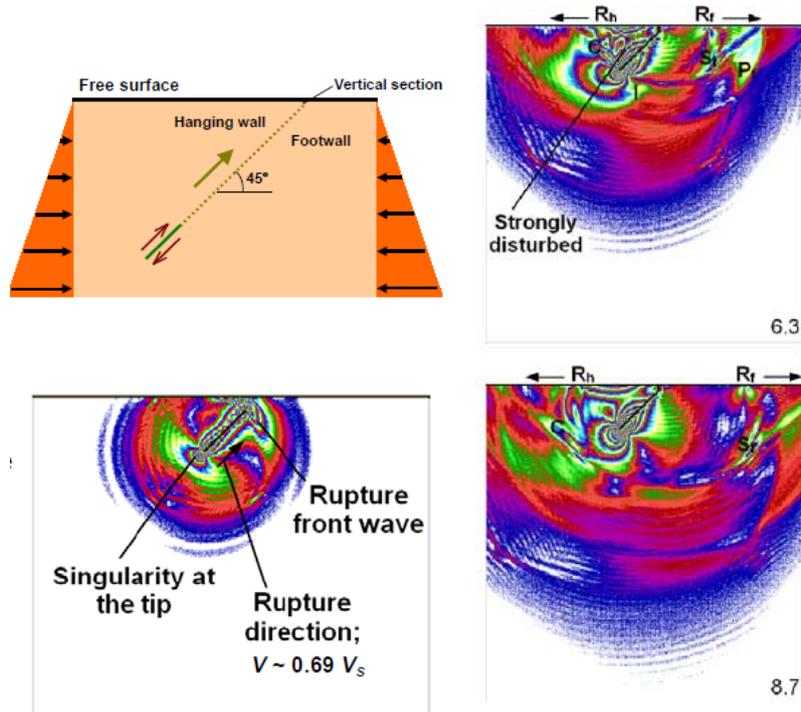
會議邀請之主題演講(Keynote Lecture)包括中國大陸之隧道工程發展、岩石力學於二氧化碳捕捉與封存之貢獻、由中期貯存到最終處置之核廢料管理對環境的影響、氣體裂解之相關耦合過程、印度的地質災害管理系統、岩石切削機具性能評估、高應力岩體之補強設計方法，代表目前岩石力學主要應用之方向。本次會議亦公布國際岩石力學學會(ISRM)將於彙整 2007~2014 研究，於 2015 發表 The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing, and Monitoring: 2007-2014，包括四部分：實驗室試驗、現地試驗、監測、破壞準則。有關針對此次蒐集目的之各項會議內容如下：

1.岩體地震與動力分析技術

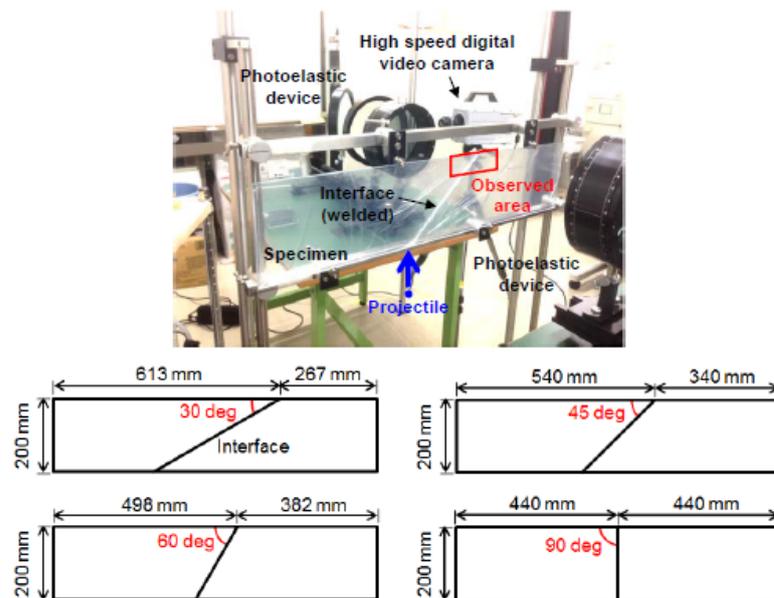
- (1)日本東京大學 Uenishi 等人發表「Fracture Dynamics of Shallow Dip-Slip Earthquakes」

藉由岩石內斷層錯動室內試驗與數值模擬成果，探討不同傾角的斷層，其上下盤受到次

音速地震波傳影響的差異，近地表處的雷利波是其研究重點。首先是藉由數值模擬產生地表雷利波，模擬結果如圖三，類似過去本所開發之地震模擬技術，圖中顯示上盤處被嚴重擾動，雷利波除了原本即在表面運動，受斷層作用震波被包圍無法外傳而增加擾動。另外，亦採用室內光彈性破裂試驗量測數據，儀器架設如圖四，以高速攝影機量測採光彈性效應變化，高速撞擊造成波傳來模擬地震波，經比對後證明數值方法可供使用。



圖三 含斷層之岩石錯動模擬



圖四 含斷層之岩石錯動震波觀測設備與試體尺寸

(2) 日本神戶大學 S. Sakurai 發表「Case Studies on the Dynamic Behavior of Tunnels Caused by

Hyogoken- Nanbu Earthquake Whose Epicenter was Very Close to the Tunnels」

隧道的耐震能力為設計需求之一，就核能工程而言，應考慮山區量體對於波傳的運動互制與慣性互制作用，屬於土壤結構分析問題。此篇仍是由觀測的角度，進行隧道動態行為的統計說明，1995 年阪神地震之震央在此隧道下方 15 公里，但主要市震後勘災的結果，並未記錄到地震時的震波。調查對象包括 NATM 工法之隧道與明挖覆蓋隧道，災情顯示 NATM 隧道的襯砌完整性遠較明挖隧道優異，並提出明挖隧道在淺覆蓋層的條件下，應注意垂直向的震動，圖五是地震導致頂拱坍塌、圖六則是隧道坍塌導致地表下陷。講者亦提醒早期地震儀採用濾波設定將高頻波濾除，若考慮到觀測的破壞模式，應注意至少應分析到 50Hz。此篇提出隧道設計的新見解，但就比較對象而言，NATM 隧道與明挖隧道位置不同，明挖隧道覆蓋層較淺，而 NATM 隧道位於山區，耐震能力包括岩體貢獻，故應做更詳細土壤結構互制比較。



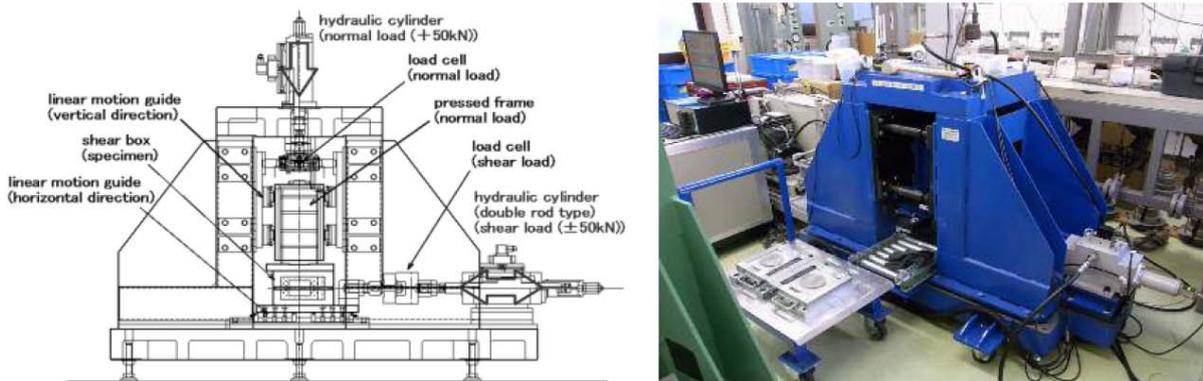
圖五 阪神地震時明挖覆蓋隧道內部受震塌陷照片



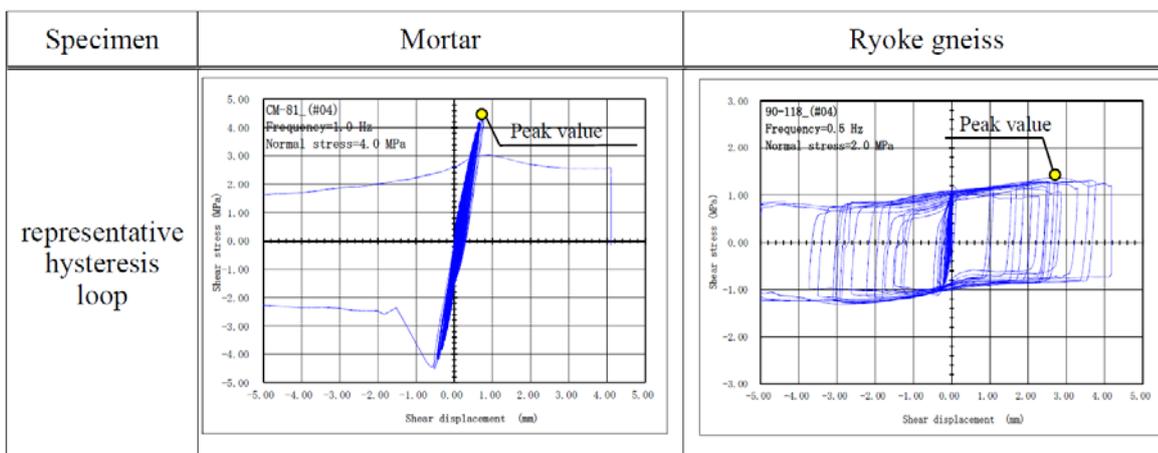
圖六 阪神地震時明挖覆蓋隧道上方地表下陷照片

(3) 日本的中國電力公司 Y. Tsubotaa 等人發表「Dynamic Mechanical Properties of Rock Joints under Cyclic Loading using Ryoke Gneiss」

經 2011 年日本東北大地震後，日本學術界已經提出新式的不連續岩層之動力特性分析法，其中不連續的岩層其動態強度與變形皆是進行岩石動態分析時不可或缺的重要參數。岩體不連續面分布對於受震反應的影響，需要在受震反應分析的參數中考慮，反覆載重試驗可獲得動態剪力強度及阻尼值。作者開發動力測試設備如圖七，其可以用來進行受地震下不連續岩層的動態反應，這套設備由 1 台 50 噸的直接剪力測試機和剪力盒所組成，可施加 50 噸的反覆剪切應力與 50 噸的正向應力，並量測對應的動態參數，該設備可以控制加載循環次數、應力振幅與輸入不同頻率段的加載波形。進行含裂隙的片麻岩(Gneiss)反覆載重測試、並以砂漿(Mortar)試體比較，試驗結果確認同一種材質試體之動態剪力強度與靜態時差不多。反覆載重之遲滯迴圈如圖八，片麻岩試體較砂漿試體遲滯迴圈大、吸能效果較好。



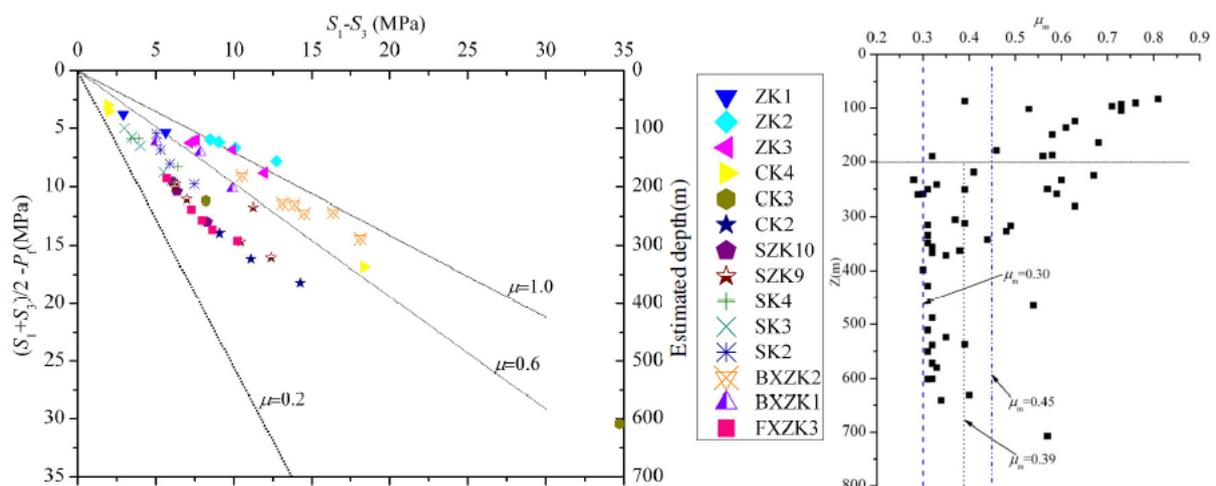
圖七 含裂隙岩石反覆載重試驗設備



圖八 不同材質之含裂隙試體遲滯迴圈試驗結果

(4) 中國地震局地殼應力研究所 Chenghu Wang 等人發表「Stress build-up in the shallow crust before Earthquakes based on the in-situ stress measurements」

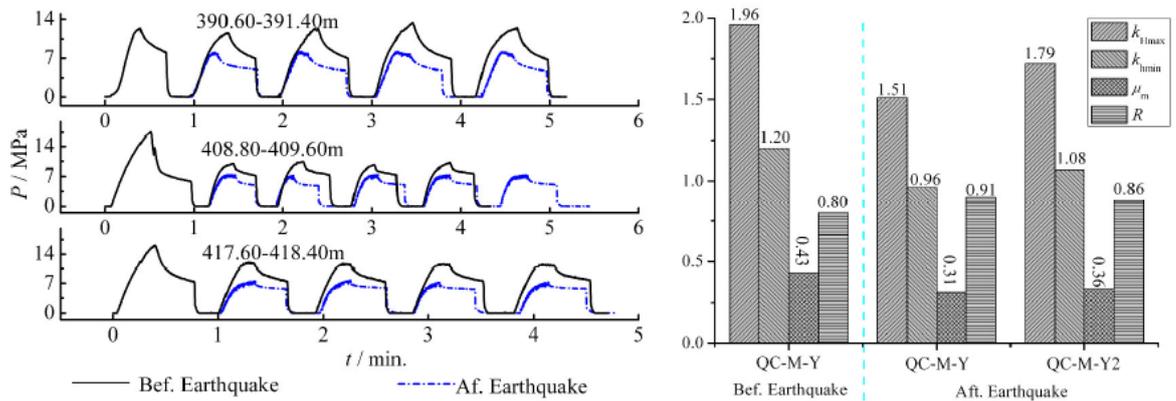
斷層錯動引發之大地震通常可視為應力累積而釋放的現象，故對地殼應力在震前震後的變化觀測，可供了解地震成因，以及做為地震發生可能性的判斷。而目前在地震模擬的工作，也須使用應力降(stress drop)，此類觀測結果可做為評估參數的依據。現地應力量測的方法為傳統的水力破裂法與擴孔法，而作者以最大剪應力 $((\sigma_1 - \sigma_3) / 2)$ 和平均剪應力與孔隙水壓差 $((\sigma_1 + \sigma_3) / 2 - P_f)$ (P_f 為孔隙水壓)之比值 μ_m ，作為應力參數，該參數亦證明可應於庫倫摩擦破壞理論，且容易反應上部地殼的應力累積。採用 2013 年蘆山地震(Lushan earthquake)、2008 年汶川地震(Wenchuan Earthquake)、2001 崑崙山地震(Kunlun Earthquake)、1995 年阪神地震(Hyogo Earthquake)資料進行 μ_m 統計，圖九是蘆山地震前的現地 μ_m 紀錄，圖 10 則是汶川地震前後的應力變化狀況， μ_m 降低約為 18.7%；崑崙山地震量測結果約為 19%~20%，與汶川地震類似；阪神地震經過長期的觀測， μ_m 先是累積，地震後下降則可達到 66.7%，如圖十一所示。對觀測與理論的解釋，作者認為上部地殼應力累積程度符合 Byerlee's law 所定義的範圍，但觀測值與理論的 0.6-1 差距甚大，統計結果約在 0.1~0.6 之間，因此後續研究仍須加強



(a) Dependence of the maximum differential stress on effective mean stress based on the data (b) Plot of μ_m vs. depth (Z)

Fig. 2 Plot of characteristics of stress data vs. depth before the Lushan earthquake (According to Wang, et al., 2014)

圖九 現地應力轉換為 μ_m 結果



(a)Original recording curves (b) Characteristics of in-situ stress data

Fig. 3 Comparison of in-situ stresses of two measurement sites before and after the Earthquake ($k_{Hmax}=S_{Hmax}/S_V$; $k_{Hmin}=S_{Hmin}/S_V$; $R=(\sigma_2-\sigma_1)/(\sigma_3-\sigma_1)$) (Guo, et al., 2009)

圖十 汶川地震對現地應力的影響

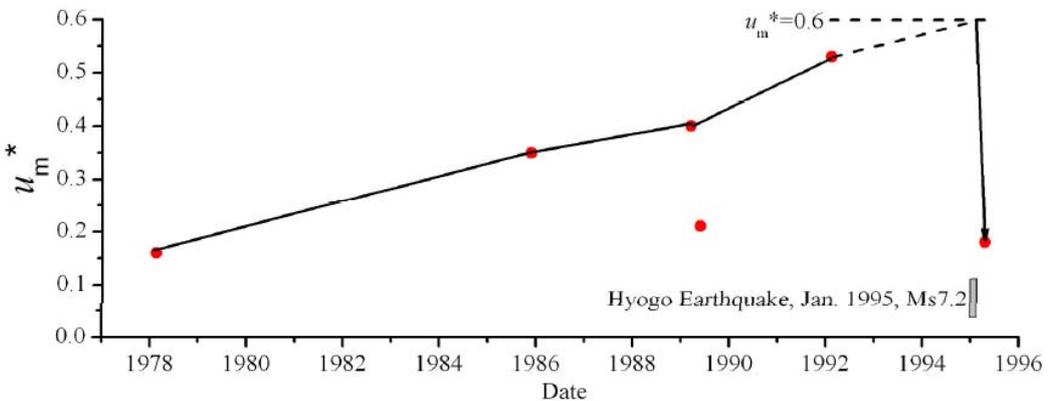


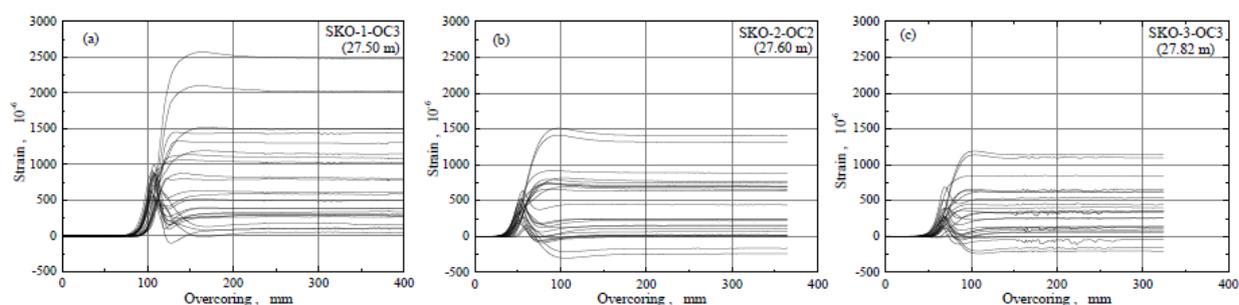
Fig. 4 Variation of μ_m^* vs. time before and after the Hyogo Earthquake in Japan (according to Tanaka et al., 1990, 1998)

圖十一 阪神地震前後之現地應力觀測變化

(5) 日本東北大學 K., Sakaguchi 等人發表「Changes In-Situ Rock Stress in the Kamaishi Mine Before and After the 2011 Tohoku-Oki Earthquake」

有關日本東北大地震對岩盤之影響，日本東北大學針對日本岩手縣釜石市的一個礦場進行從 1991 年到 2014 年的長期岩層觀測研究，期間經歷 2011 年東北大地震，應力觀察則採用錐端鉗孔套管法進行 Compact Conical-ended Borehole Overcoring (CCBO)技術進行，此方法也是 ISRM 的建議方法之一。長期觀察結果發現，該區岩盤的最大主應力的方向和在地震發生前後沒有太大變化，然而，中間主應力和最小主應力方向在地震發生後一年時較地震前有不同的方向，即中間主應力是在東西向的水平向，而最小主應力是在垂直方向上，這可能是一種逆斷層的壓力造成的現象，並在地震發生後三年持續維持此現象。此外，中間主應力的大

小和最小主應力在地震發生前與發生後兩年間幾乎相同，在地震後兩年間垂直應力幾乎和岩盤上覆壓力相同的。而且主應力在地震發生後達三個年時幾乎和震前維持一樣的應力變化。這些結果說明，在應力變化的大小是由震後地殼的隆起所造成的。此外，震後一年平均剪應力的比值較震前顯著下降，但記錄到地震後的剪應力值有增加的趨勢。可能的原因是剪切應力雖有增加的趨勢，並在地震發生後恢復到原來的情況，現場量測結果如圖十一所示。



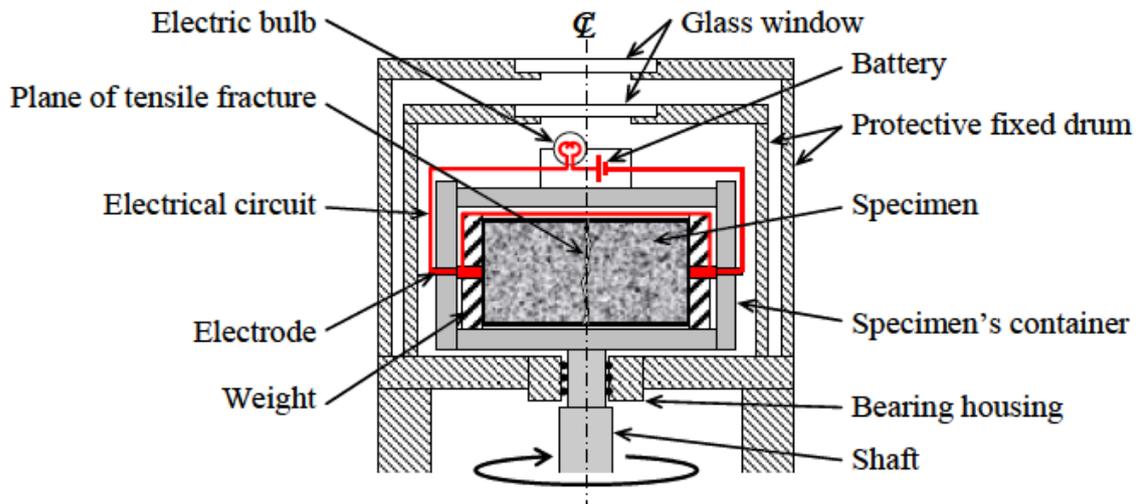
圖十一 日本岩手縣釜石市的岩盤應變量測結果圖

2.地工離心機應用研究

進行大地工程的模型試驗時，常利用人造重力場的方式來進行縮尺試驗，所以使用與原型相同的材料來製作 $1/N$ 的縮尺模型，然後在 $N \cdot g$ 條件下進行試驗，可以使模型在與原型完全相同的應力條件、強度和勁度性質下進行試驗，也就能顯現出原型的力學行為，即稱為地工離心機試驗法，國內採用此試驗法常針對樁基礎、邊坡結構等大地工程結構進行試驗，也可搭配小型振動台的設置來了解受震下的動態行為。

(1) 日本地球科學防災所 K. Tani 與橫濱大學教授 K. Hayano 發表「Development of Centrifugal Tensile Test Method to Evaluate Tensile Strength of Softrocks」

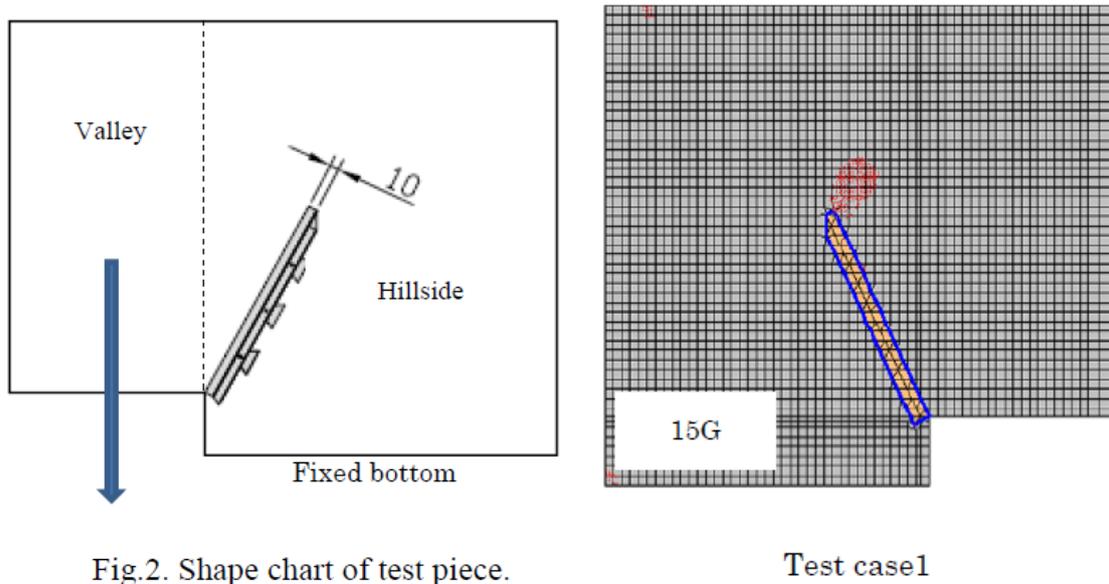
此研究發展出一套利用離心機進行岩體或混凝土試體抗拉特性的試驗，詳細試驗設計如圖十二所示，藉此獲得軟弱岩體的抗拉強度，並可計算出拉伸破壞率與拉伸量，此次新型試驗法應用在地工離心機的案例實為創新研發之例，試驗過程中也能確保試驗設施的安全性與試驗結果的準確性。



圖十二 採用地工離心機進行軟弱岩體抗拉試驗設計圖

(2) 日本寒帶土木工程研究中心 Y. Kusakabe 等人與豐橋技術大學 K. Miura 發表「Study on Bedrock Collapse Using Centrifugal Model Tests to Consider Deterioration around Cracks」

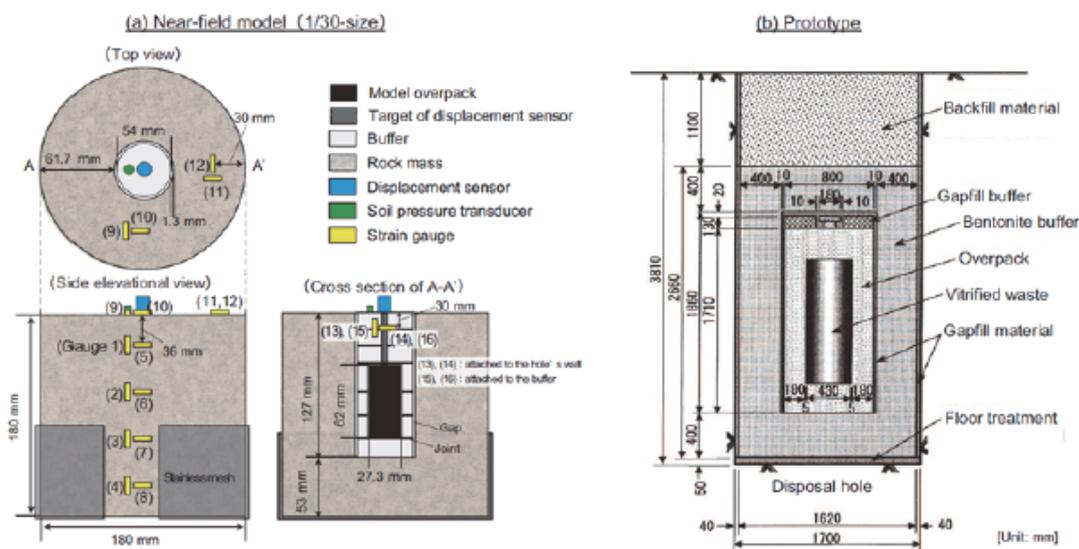
此研究利用地工離心機來了解大型基岩崩塌的機制，透過模擬接近頂部或基岩的底部產生裂紋的行為，來進行離心模型試驗及基岩崩塌的穩定性探討，試體與數值模擬如圖十三，試驗結果發現基岩崩塌的穩定性與在周圍的裂紋岩石的彈性模量有關，其穩定性會隨著裂縫的降低而增加，其結果並與數值模擬法驗證後相吻合。



圖十三 採用地工離心機之岩石崩塌試驗與數值模擬
(左圖為試體配置、右圖為數值模擬)

(3) 日本電力研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI) M. Sawada 等人發表「Numerical Simulation of Centrifugal Model Test for Long-Term Behavior in Near-Field of High-Level Radioactive Waste Disposal」

利用地工離心機來探討近場的長期熱-水-力耦合效應(THM)，並將試驗結果與數值模擬分析進行比對(試驗分析方式如圖十四所示)。試驗結果發現離心模型試驗恆定應力邊界條件可能會較原地條件有較大的岩體膨脹比，但機械邊界條件並沒有影響在沉積孔緩衝區的行為；從數值模擬與試驗測得的膨潤土壓力和外包裝的位移量，當使用壽命達到 100 年的後其膨潤土周邊壓力並無下降趨勢。這些試驗都可做為未來相關研究之參考依據。

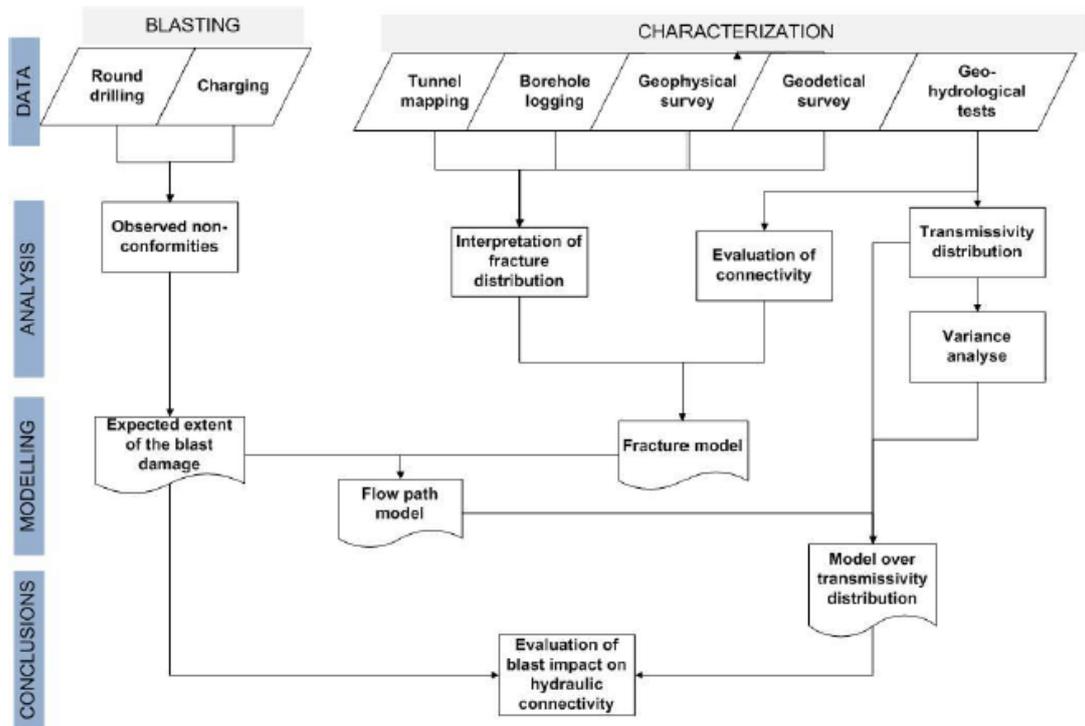


圖十四 採用地工離心機進行 1/30 縮尺廢棄罐 THM 模擬試驗

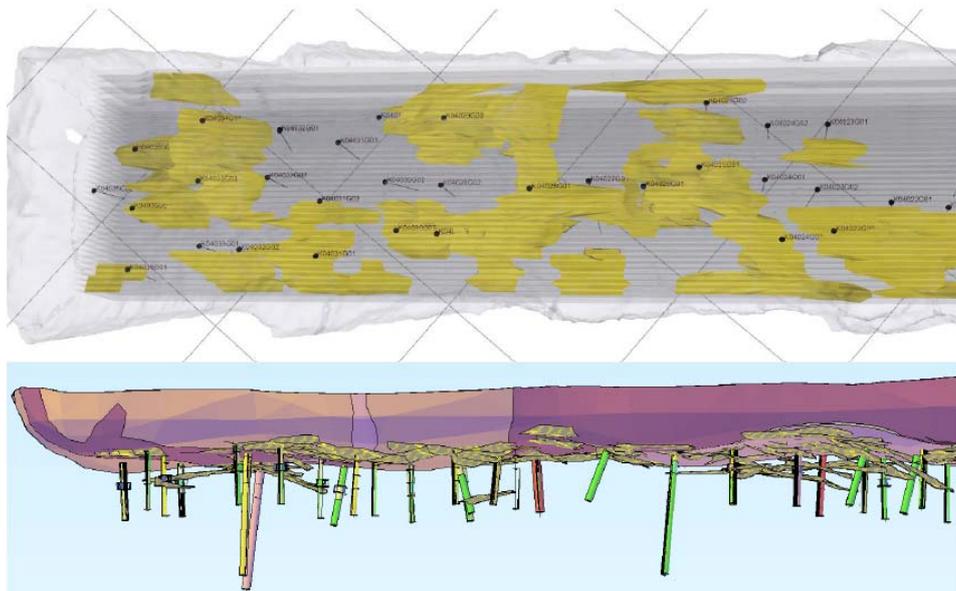
3. 地下工程場址調查

瑞典核廢料與廢棄物管理公司(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB)近年來針對不同類型的高放射性廢棄坑道進行擾動區、開挖區與破壞區的各式研究，進行地下貯存坑道設施的相關地下建築設計研究，包含地下建築物的平面布置、環境評估、開挖、建造與封閉技術研究等技術，藉此了藉此瑞典的 KBS-3 廠址其相關特性。在進行施工階段前，全面性的基盤地質調查與母岩地震特性評估是不容忽視的，該篇論文則是針對場址的地質、幾何條件、水文地質調查與地球物理面進行基盤調查，並針對地下隧道設施在飽和地下水的條件下進行水力特性評估，藉此結果作為後續進行開挖擾動區的水力影響評估建模之用，SKB 公司的基盤調查與評估流程如圖十五所示，GPR(High frequency Ground Penetrating

Radar)的分析結果如圖十六所示，其研究成果展示與表示方式相當清晰明確，有助於後續研究人員清楚了解地盤調查的結果，跳脫過往的繁雜數據呈現方式，後續進行數值模擬分析也更快引用相關參數並完成細部結構設定。



圖十五 基盤調查與評估流程圖

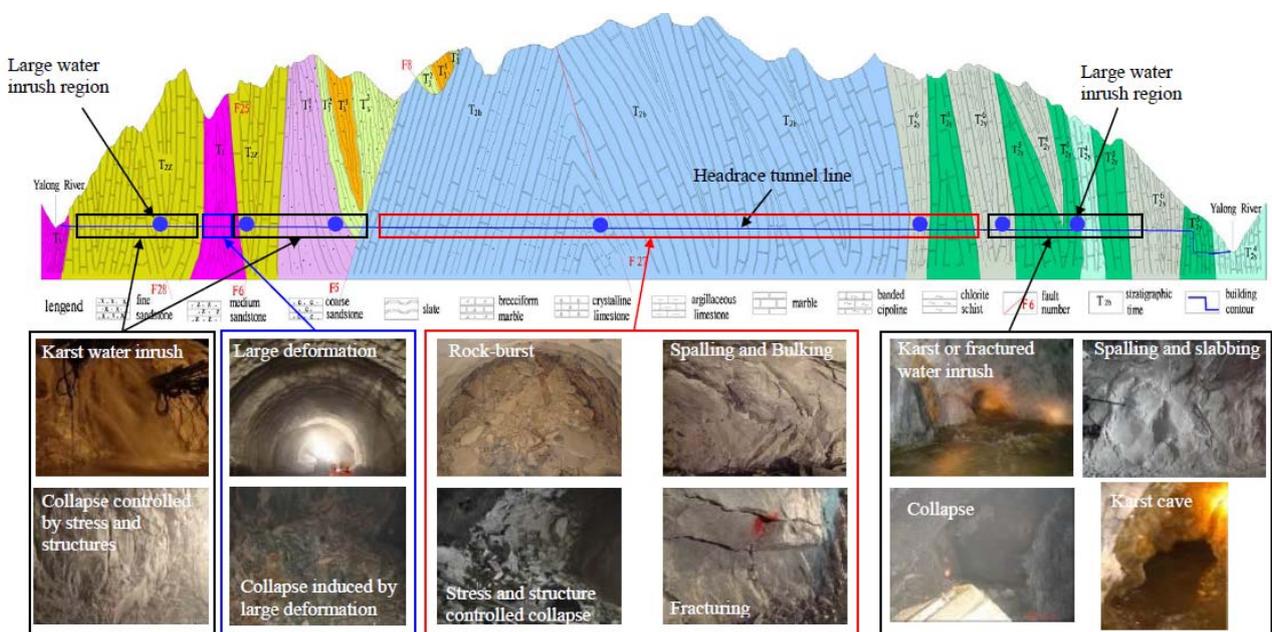


圖十六 GPR 的分析結果 3D 圖像顯示圖

4. 隧道工程進展

(1) 隧道工程問題處理方法

中國科學院武漢岩土力學研究所之馮夏庭在 Keynote Lecture 時發表「Tunnelling and Underground Construction in China - Challenges and Progress」，案例為金沙江支流的錦屏 II 水電站工程，具有複雜隧道配置與大斷面特性、並同時使用 TBM 與鑽炸工法，隧道直徑達到 12.4m、間距為 13m，且有複雜的地質(如圖十七)、覆蓋曾達到 2.5 公里，故現地應力量測高達 70MP，這些因素亦導致工程問題如圖十七，包括隧道坍塌、大變形、岩爆、剝落、破裂面產生，此會議主要說明岩爆、大變形、湧水的處理與預測經驗。岩爆在高覆蓋層的隧道很容易發生，會導致人力傷亡、機具損失、以及開挖面再次施工的問題，目前已可採用微震儀做為岩爆前後之岩體地震監測，而錦屏 II 的隧道已開發出岩爆風險評估方式，此監測結合能量釋放評估，預警準確度已大幅提升。對於大變形擠壓的處理，在台階開挖進行開挖順序的安排，或採用超挖量來防止。

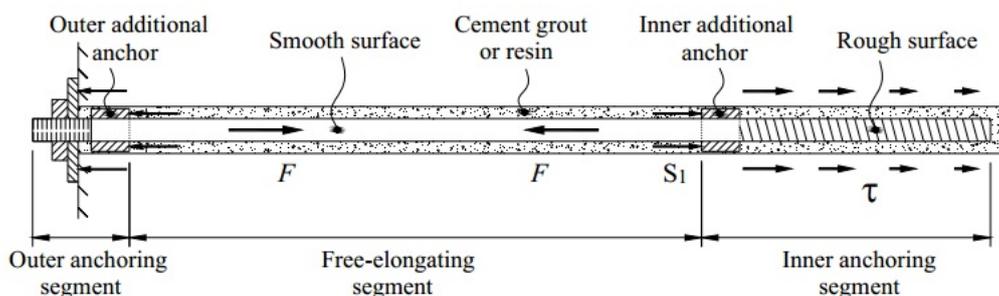


圖十七 錦屏 II 水電站工程隧道開挖之工程問題

(2) 改良式岩錨模型研究

日本長崎大學與中國山東科技大學教授針對高圍壓應力狀態下設計一種新式的吸能型岩

錨，論文標題為「Experimental study of a new energy-absorbing rock bolt under static loading condition」，此支撐系統主要是希望能在高圍壓狀態下，岩錨可以支撐高負重且容許岩石產生大變形量，此岩錨係由鋼條和兩個額外的錨定螺栓所組成，中間段為光滑面，內段則設計加工成為粗糙面，外部則由水泥砂漿或樹脂砂漿所包覆，如圖十八所示。

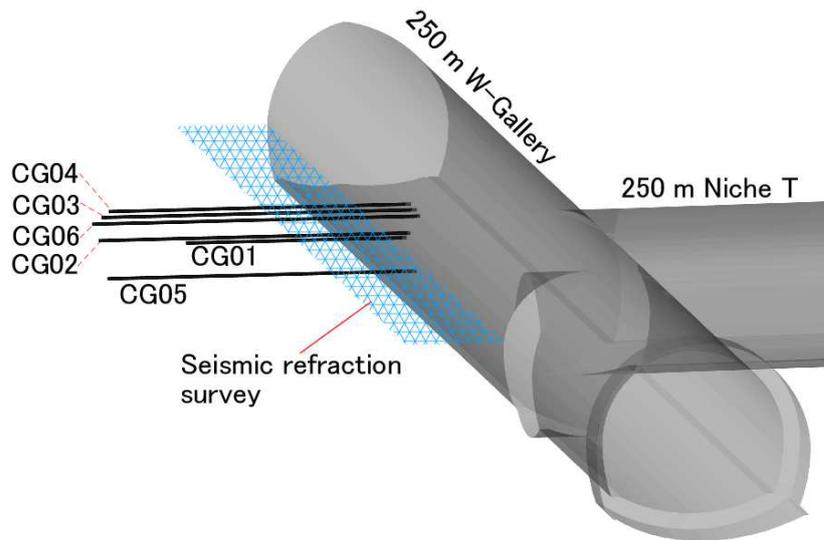


圖十八 新式岩錨設計圖

透過靜力拉伸試驗結果發現，在高圍壓條件下，受力和應變的增加會導致傳統岩錨產生破壞現象，其破壞現象是表面水泥漿和岩錨本體產生脫離破壞所致，新型的岩錨則可以讓本體鋼條先產生較大的降伏變形後，才會發現本體與外包覆的水泥漿脫離破壞，故可以提供更大的變形能力，以適應岩石的脹縮問題，水泥漿在不同的張力和壓縮的耦合作用位置可以增加內錨固段極限承載力。此外，在裡面的固定段的應力分散結構可使得粗糙桿的載荷低於光滑桿，防止岩錨的過早失效，其也能吸收大量的能量來保持圍岩的穩定性。

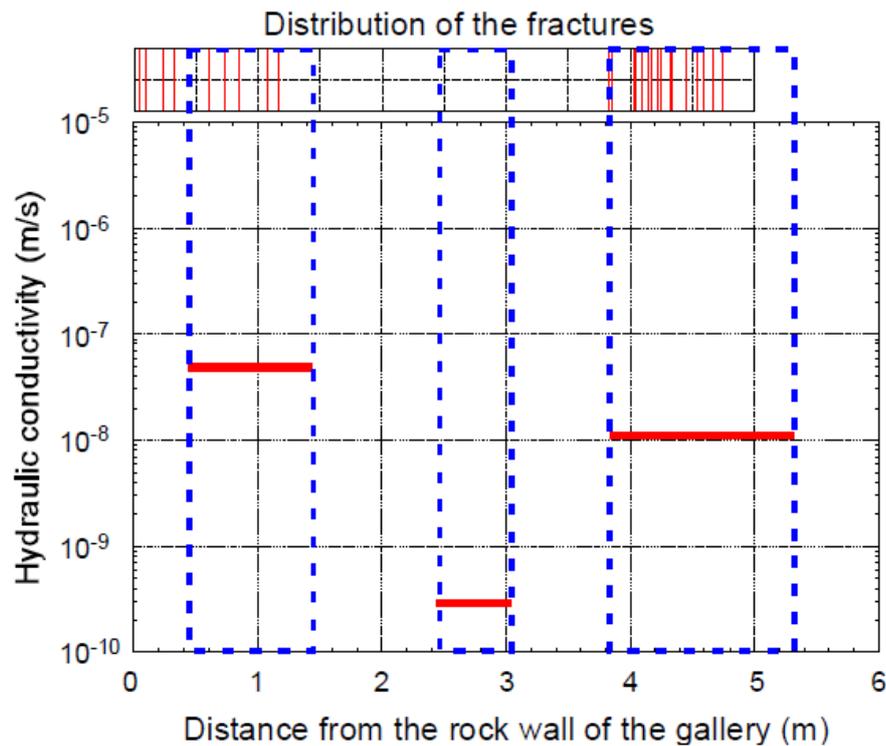
5. 地下岩石實驗室

日本 JAEA 為高放射性處置計畫在北海道設有 Horonobe 實驗室，此會議中由 Kazuhei Aoyagi 等人針對開挖擾動帶 (Excavation Damaged Zone) 發表「Hydrogeomechanical Investigation of an Excavation Damaged Zone in the Horonobe Underground Research Laboratory」，在 250m 深的廊道，以反射震測、鑽探孔內攝影、及進行水力測試，獲得具有較高密度裂隙及水力傳導係數的 EDZ 範圍約 0.2~1.2m，現地試驗布置如圖十九。圖二十為 CG01 孔的水力試驗結果，曾執行之未擾動岩體水力試驗紀錄為 10^{-9} 到 10^{-10} m/sec，在 0.5~1.5m 處量測結果為 4.9×10^{-8} m/s。



註：CG 代表鑽探孔

圖十九 現地試驗佈置圖



圖二十 CG01 孔之現地水力試驗結果

6. 氣體滲透與封存研究方法

二氧化碳封存的研究需瞭解地底高壓環境下，二氧化碳與孔隙水的關係，是否為岩體能被封存，因此高壓環境的氣體滲透為主題之一，在澳洲 Perera 針對「Effects of Carbon Dioxide Sequestration on Coal's Hydro-Mechanical Behaviour」的介紹中，利用圖二十一的高圍壓三軸

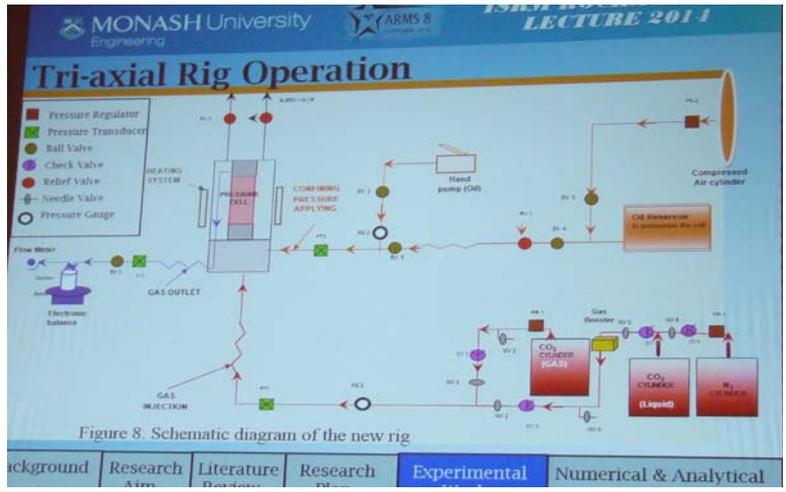
室試驗獲得研究成果，可供本所未來試驗計畫參考。

二氧化碳捕捉與封存目前已有現地實驗結果，日本 Matsuoka 發表「Contributions of Rock Physics to Carbon Dioxide Capture and Sequestration」，採用 Teikoku 石油公司在 Minami-Nagaoka 的油氣田進行示範廠計畫，示範廠與評估之觀測井如圖二十二，也利用震測瞭解封存程度，由觀測結果證實輸入氣體並無法完全移除孔隙水，如圖二十三所示，而目前則已建立可推估最大封存量的模式，有助於封存量的評估。

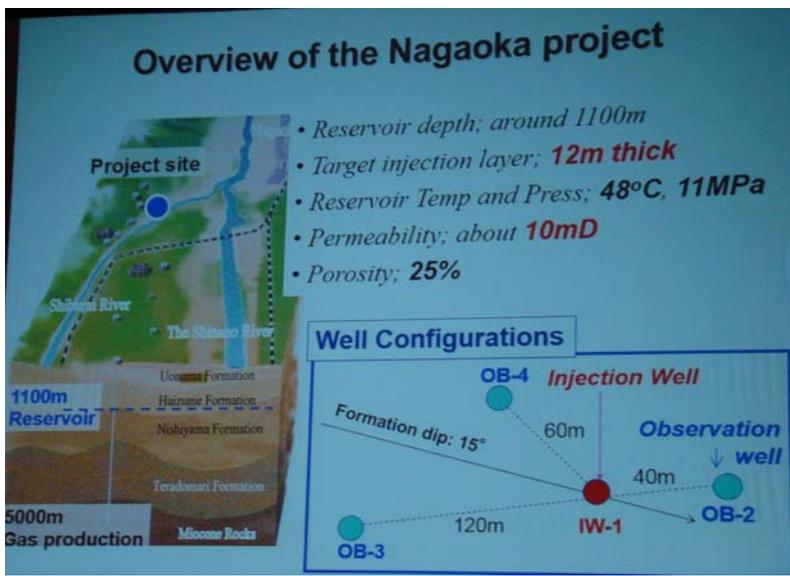
目前在採頁岩氣採用水力裂解法，Elsworth 在「Key Coupled Processes Related to Gas-Fracturing in Unconventional Reservoirs」，提出採用氣體則能節省水源與避免黏土層活動，其研究針對不同氣體在高壓形成次臨界或超臨界液體後，對於水力裂解的破裂壓力，提供實驗室測試結果，將有助實務工作。

LNG 氣體採用岩室貯存的設計已在日本及其他國家進行，日本亦有計畫採用岩室建立國家能源儲備。日本 T. Mori 在「Construction of Operation Shaft and Plug to Secure Airtightness in The Kurashiki Underground LPG Storage Cavern」，說明日本的 LNG 國家儲備共計 150 萬噸，包括 85 萬噸為地下貯存、65 萬噸為地上貯存，而 Kurashiki 場址則有 40 萬噸，氣體洩漏風險是這類設施主要的工程問題之一，該計畫分析了四種可能的洩漏途徑，針對封塞處的開挖方法、擾動範圍均有評估及事後檢測，最後則採取超細粒混凝土的灌漿方式處理。

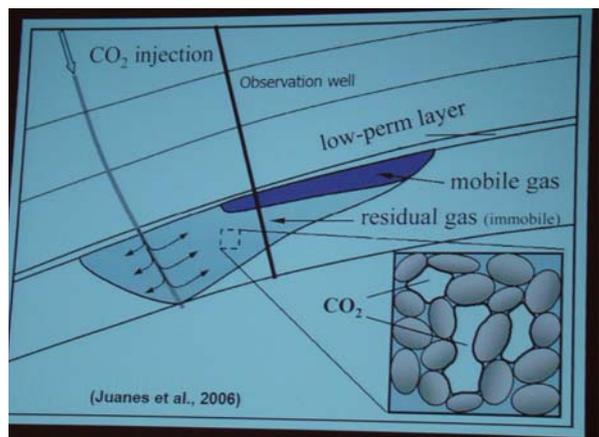
根據日本 Yoshinobu Nishimoto 在「Experimental study on the gas tightness of a mined cavern with groundwater」，說明日本對岩室中的氣密性已有設計準則，氣體洩漏途徑為岩體裂隙，可採用地下水做為圍幕防止洩漏，故設計上要確保埋置深度地下水與內壓力間的水力梯度需足夠。此篇文獻採用試驗來進行設計驗證，觀測毛細壓力與氣泡力學行為，驗證常用之水力梯度設計。



圖二十一 進行岩石高壓氣體滲透試驗之三軸室配置圖



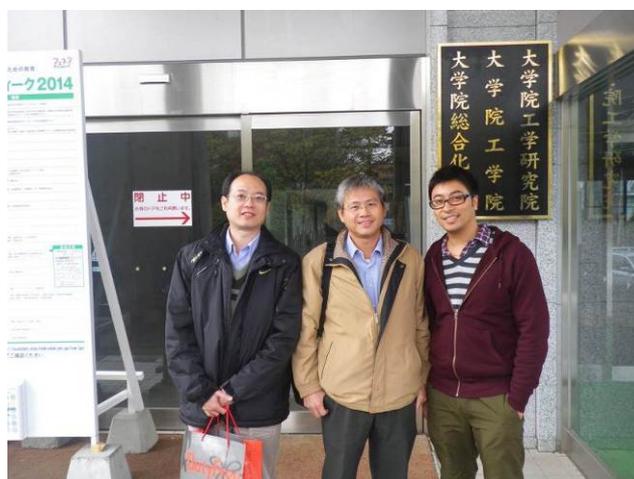
圖二十二 日本 Nagaoka 二氧化碳封存示範計畫



圖二十三 二氧化碳於岩層中封存之位置示意圖

(二)參訪北海道大學

北海道大學位於札幌市區札幌站旁，本次行程為 10 月 17 日早上赴該校工學院永續環境政策與工程所的工程維護系統實驗室參訪(北海道大學的簡介如附件二)，該實驗室的負責人為亞洲混凝土聯盟(Asian Concrete Federation, ACF)主席的 Dr. Tamon Ueda 教授，Prof. Tamon 在土木工程領域中頗具盛名，近幾年有參與亞洲混凝土相關規範與歐洲規範的制定，主要從事既有鋼筋混凝土結構物的修補與補強、新型材料與結構、混凝土材料與結構受損之評估、結構設計之改良等研究領域，此行程主要由該實驗室的 Dr. Justin Shresha 負責介紹近期研究工作與實驗室主要設備，會談當中除了解該團隊的近期針對修補技術與修補後界面損害的研究議題外，我們也向 Dr. Justin Shresha 簡要報告預先製作好的投影片內容(如附件三)，內容包含核研所的近期針對劣化後 RC 結構對耐震行為影響的相關成果，Prof. Tamon 實驗室的研究團隊由幾個不同國籍的學者組成，很歡迎各國學者進行合作研究，其具備的國際視野是很值得學習，特別是未來邀請國際知名研究學者的技術交流，或是增加本身之國際觀，都值得學習借鏡。拜訪照片如圖二十四所示。下述則針對本次參訪過程彙整成兩個重點進行介紹：

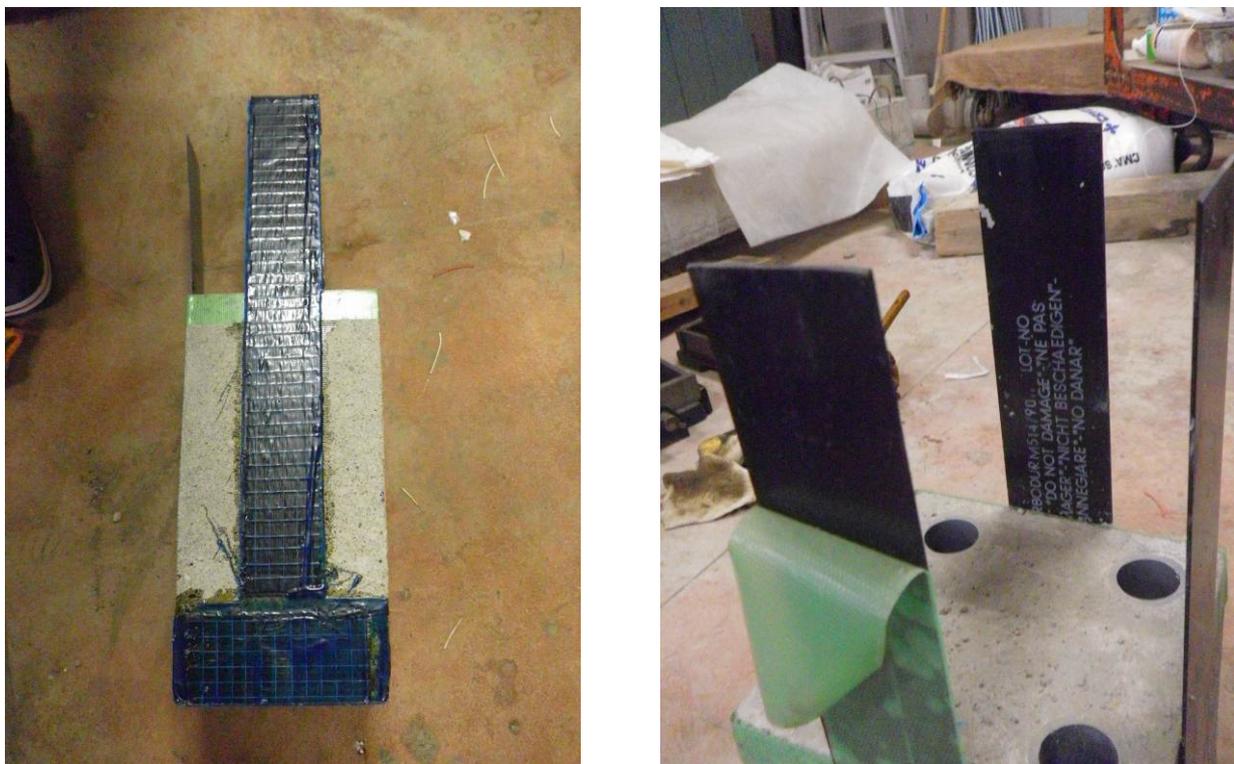


圖二十四 與北海道大學 Dr. Justin Shresha 之合照

1.纖維增強複合材料(FRP)性能評估研究

在橋面、停車場、水和污水處理設施、海洋結構和化工廠等處，對 FRP 鋼筋代替傳統的鋼筋能克服腐蝕問題是近期的重點研究。瞭解 FRP 補強除了其具有非腐蝕性的優異特性外，尚具有高強度-重量比，良好的抗疲勞特性和耐用性。這些先進典型的複合材料在大撓度和寬的裂縫特性下，產生相對較低的彈性模數，根據 FRP 不同產品類型之粘結強度與破裂，其彈

性和線性的應力--應變圖中沒有明顯的降伏點。過去研究發現，FRP 筋加固混凝土結構主要是受撓度和裂縫之適用性標準來設計。北海道大學的研究團隊選用各種檢驗方法來確認評估 FRP 鋼棒與鋼筋混凝土構件的撓度及其適用性。並將修改這些檢驗方法導入在裂紋開裂模式和傳播程序中而觀察到實驗方案的性質。此外，FRP 不同產品類型與基材(混凝土或砂漿)的粘結強度是相當重要的關鍵，施工時必須先確保 FRP 能有效與修復面或基材完整黏貼，才能確保 FRP 可提供上述的優良力學特性。圖二十五為 Dr. Justin Shresha 向我們展示的 FRP 黏貼於基材上之試體，其利用拉拔試驗與剪力試驗，來驗證其界面黏結特性。



圖二十五 FRP 黏貼特性試體

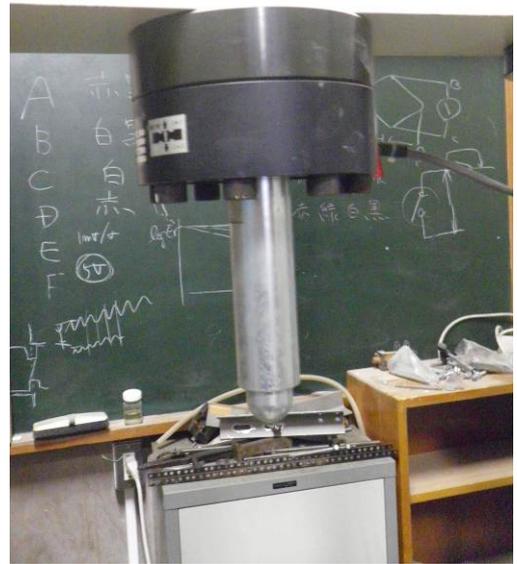
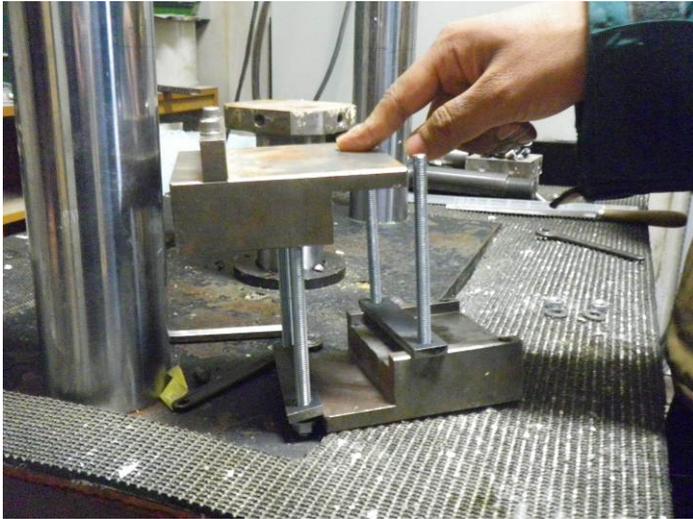
2.既有鋼筋混凝土修補界面技術之研究

世界各地許多鋼筋混凝土結構劣化的案例，結構長期使用壽命銳減，據估計鋼筋混凝土結構的平均使用壽命可短至幾十年來，普通混凝土脆性低抗拉特性會導致的其在鋼筋混凝土結構的裂縫負載或氣候負載(及耐久性)考量時的應變能力大幅降低，在這樣的裂縫形式發展下，環境中的有害離子，如氯離子或硫酸根離子等，很容易達到鋼筋造成腐蝕的開始，鋼筋混凝土結構的耐久性也受到很大的影響，然而提供鋼筋混凝土結構或構件適當的修補能有效

改善上述問題的持續性劣化，藉由修補及維修來延長結構物的使用年限。此行 Dr. Justin Shresha 向我們介紹其研究團隊近年花大量研究人力所投入的修補界面特性研究工作，首先向我們介紹新舊界面的黏結測試試驗(詳圖二十六)，其試體會進行抗壓、劈裂與抗剪力試驗，主要探討不同水泥質黏結材料對基材(混凝土或水泥砂漿)修補後，其力學性質是否仍符合設計需求，以及新舊界面的黏結特性驗證，藉此確保修復工作的可靠性與持續性。該研究團隊也針對混凝土材料設計一套抗剪力試驗夾具，用來作為驗證界面剪力，其夾具外觀與承壓桿如圖二十七所示。



圖二十六 修補材料黏結測試試體



圖二十七 修補材料抗剪力試驗夾具

此外，Dr. Justin Shresha 也向我們介紹實驗室內幾個重要的研究設施，包含凍融模擬試驗機(如圖二十八)、動態荷重與疲勞試驗機(如圖二十九)、靜態萬能載重試驗機(如圖三十)、鹽水自然滲透試驗裝置(圖三十一)等設備與試體，都是後續因應工程設計需求所對應要驗證的試驗項目，藉此確保修補材料能完全與基材黏結後，在驗證其力學特性、抗地震特性、疲勞性能與耐久性。



圖二十八 凍融模擬試驗機



圖二十九 動態荷重與疲勞試驗機與其試體



圖三十 靜態萬能載重試驗機



圖三十一 鹽水自然滲透試驗裝置。

。

三、心得

(一)深層地盤受震反應之現況

由於地震危害度與地盤反應研究領域為本所既定工作，此項研究包括震源、路徑、廠址反應的影響效應、和近地表波傳的反射、折射影響有關、也和是否是水平層或是山區受土壤-結構效應影響。故波傳現象影響的參數綜多，且波傳在廠區各深度位置，到底是衰減趨勢、還是放大趨勢，尚難以一概而論。基本上山區與平原區的岩體地震反應將會有所不同，我國核電廠鄰近山陵環繞，波傳亦有可能受此影響，目前美國法規是將地震動衰減律公式應用至地底深處，以地震危害度技術產生地震反應譜，再由危害度設定點處開始進行地盤反應分析。但衰減律適用的深度範圍將影響地盤反應分析的設定，詳細的應用方式在國內並未曾討論及建立規範，而遇到與地盤反應分析理論不同的山區地形，其處理原則也尚未建立，此部分仍應於未來持續研究。

(二)核能電廠地盤條件與埋置深度

地盤是結構載重往下傳遞的途徑，也經此將地震波上傳至結構，核電廠需討論的包括土壤承载力、變形、液化、土壤結構互制(Soil Structure Interaction, SSI)、以及受到鄰近斷層影響而有斷層錯動引發的變形，電廠的地盤反應分析是相當複雜的。本次研討會中美國 Itasca Consulting Group 顧問公司提出一個新的觀點，其指出一般核電廠都要求要構建在堅硬的岩盤上，基於這樣的事實，即堅硬的岩盤頂部較更軟弱的沉積岩而言，研究發現於地震波向下傳播時會發生共振的趨勢，且會隨著地動產生放大的效益。為達防止發生海嘯破壞的需要，原則上，核電廠廠址要建置在高於任何潛在海嘯可能達到的海拔高處，然而，上述這兩個目標往往產生相互衝突的矛盾現象，該研究者觀察日本福島核電站的情況來看，該核電廠的反應爐是坐落在高程 35 m 處，電廠基礎建築在堅硬岩盤的高程則是 10 m 處，如此的建置概念可以降低其受地震的影響，和減少抽水泵補的運營成本外，但是卻增加了遭受海嘯衝擊的危機。因此，該顧問公司提出一個新的想法，建議建置地下核電廠，只要採用適當的工程方案對電廠周邊進行密封工作，則能提供此地下結構受到免於海嘯的破壞性影響的保護。

(三)核能電廠土壤結構互制研究

針對 SSI 的部分來看，美國核能管制委員會(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC) NUREG-0800 3.7.2 節，除提供地震動態分析與 SSI 分析的一般指引外，亦規定了核能應用上可接受的基準，亦明訂 SSI 分析在核電廠動力分析中的重要性。另外，一般建築結構在耐震分析與設計時，經常忽略 SSI 效應的影響，但在核電廠結構的耐震分析和設計中，是不能忽略 SSI 效應。因此，實際工程設計中的焦點則是著重在：什麼條件下考慮 SSI 效應、什麼條件下不考慮 SSI 效應、以及在相同條件下考慮 SSI 效應和不考慮 SSI 效應對分析結果的影響有多大。考慮 SSI 時，一般情況下結構體的週期延長，阻尼增加，大部分結構的底部剪力減小，結構層間位移減小，結構體頂層位移增大，而基礎土壤的加速度最大值比附近的自由場稍小。但進一步的研究發現，從高振態影響來看，結構頂部幾層水平地震作用有時反而有增大現象，考慮 SSI 作用後對結構並不一定偏於安全的，因此對基礎和結構相互作用下的結構體的動力反應特性是值得做進一步的研究。

(四)混凝土老劣化對土壤結構互制反應之影響

另外一個值得關注的問題是：結構物的基礎如樁結構等埋置於土壤層中，基礎皆採用混凝土材料，混凝土材料具有原料來源取得容易、強度高、體積穩定性佳、易施工等特性，因此混凝土是目前用量最大之營建材料。由於台灣位處於亞熱帶地區，多暴露於高溫、潮濕及多鹽分的環境，地下水或地表雨水滲入將隨著使用時間而滲入混凝土中，長期下來混凝土內含水量增加，有害物質也隨水進入，混凝土中的水化物有時會溶解於水中，導致混凝土的孔隙增加，造成混凝土強度下降，耐久性喪失，嚴重更會造成混凝土內鋼筋銹蝕等問題，因此對營運中核能電廠結構體基礎老劣化採行必要的評估，方能確保核設施防護措施安全無虞。因此，核能電廠結構體除耐震能力及 SSI 的分析外，當考量核能電廠延役與除役等問題時，核電廠混凝土結構的耐久性與老化問題，也是當前值得深思的問題，特別是 SSI 效應對老劣化結構體的影響，目前國內極少關於此方面的研究。混凝土結構在核電廠中扮演相當重要的角色，包含輻射屏障、氣密等功能，或是混凝土製的低放射廢棄貯存庫與貯存桶，如不做好混凝土耐久性與老化評估，核能設施將會造成周遭居民與環境極大的影響。

(五) 既有混凝土基材之間的界面黏結力之探討

現在的混凝土表面修理要比過往混凝土來得複雜，基於高性能混凝土的使用、混凝土被使用在不佳的環境裡、結構型態更為複雜(如預力、預鑄、複合材料等結構型態)、針對特殊應用，有許多新的修補材料出現，以及對於如何鋪設修補材料，有新的方法出現等議題，導致修補技術的複雜度提升。混凝土結構物的表面修補，是要達到取代遭受破壞的混凝土，恢復其結構上的功能，保護不受到攻擊性環境的影響，並恢復使用者所需求的功能，在修補材與既有混凝土基材之間的界面黏結力與界面應力狀態是必須要進行分析與試驗的部分，圖三十二為既有結構物修補後的失效案例，修補材料容易因自體乾縮發生裂縫，以及界面處理不當造成界面剝落或剝離等問題。

新舊材料的界面是修補工作中很重要的因素，其發展鍵結的關鍵包含：乾淨且健康的基材表面、基材表面的粗糙度要足夠，使得機械性的契形力產生、基材有開放的孔隙結構(讓修補材可以滲入)、修補材或是黏結劑的量足夠，以致於可以滲入基材的孔隙內、以足夠的壓力讓修補材與基材間的黏結線有足夠的接觸等要素。然而，修補的耐久性，界面黏結為重要因子，界面的黏結處，可能會承受因體積變化所帶來的應力。應力的型態與結構的形式還有使用的不同而有所不同。解鍵(debond)與否端視修補材與基材在界面的黏結力是否夠強，在界面處抵抗剪力作用不單單只是靠黏結力，還靠骨材所提供的界面卡樺力來抵抗，最後，初始的高黏結力不比黏結性的耐久性更重要，顯見界面黏結是個重要關鍵要素。



圖三十二 RC 牆面外牆修補後失效之案例圖

(七)老化效應對廠房結構分析之影響

儘管混凝土已廣泛應用在土木工程領域中，但這並不能說明鋼筋混凝土結構是完美無缺的。實際上，在混凝土應用於土木工程至今的 150 年間，大量的鋼筋混凝土結構由於各種施工或環境因素造成結構體構件功能失效或崩壞，以致服務壽命縮短而達不到設計的使用年限，其原因僅有極少部分因使用荷載與結構設計承載力不足所致，但大多數肇因皆為結構體的耐久性不足而引起的失效，特別是海洋環境下的混凝土結構，由於海水中的氯離子會持續滲透入混凝土內部，導致鋼筋鏽蝕而使結構發生早期損壞，喪失了結構的耐久性能。所謂混凝土結構的耐久性，是指混凝土結構在自然環境、使用環境及材料內部因素的作用下，在設計要求的預期使用壽命內，不需要花費大量資金進行維修與補強工作而可保持其安全、適用和外觀要求的能力。美國 1930 年代建造的 Alsea 海灣上的多拱大橋，1960 年代建造的舊金山海灣 San Mateo- Hayward 大橋均由於對混凝土耐久性認識不足，在使用不到 20 年的時間裡，大量氯離子滲透，使鋼筋發生了嚴重的鏽蝕，相關部門則需投入大筆資金進行結構體修復與補強工作。從過去的研究及現場觀測結果發現，鋼筋的鏽蝕是影響混凝土結構耐久性的主要因素，而處於海洋環境下的混凝土結構，由於海水、海風、海霧中的氯離子以及使用海砂造成鋼筋混凝土結構破壞、耐久性喪失，給社會帶來巨大的經濟損失。可見氯離子滲透引發鋼筋鏽蝕的嚴重性是值得深入研究。因此，臨海建造之核能電廠上部結構及地下基礎結構部份，皆易受氯離子或海水滲透造成鋼筋鏽蝕等老劣化情況，混凝土開裂後將使結構體部分構件承載力及耐震力喪失，嚴重將造成結構體崩壞及功能性喪失等問題，進而影響到核電廠結構體的耐久性與服務壽命。

四、建議事項

(一)強化深層地震動研究

深層地震動未來應綜合深井觀測資料、理論解析，檢討應用方式，對於高覆土層的國內電廠廠址，提供此研究成果。國內地震動之經驗衰減律發展，並未考慮到深層的高剪力波速岩層，因此不足以應用，強化方向可朝深井觀測資料、理論解析。而此研究過程，應將地震波衰減與地盤反應兩個作用分離，地盤反應也需要考慮地形影響等因素，並以建立本土適用衰減律為目標。

(二)地盤反應分析能力持續投入

針對地形、岩層的複雜性，地盤反應分析可持續投入，以細緻廠區地震動擬定之成果。目前核能法規雖僅強調一維地震波傳模型，但對地形或岩層較複雜的廠址，亦要求多方研究。本所過去已有針對此類問題進行研究，但參考 EPRI-1025287，包括參數不確定性、深層反應的計算，國外產業發展經驗可供參考，未來仍需加強此方面的研究。

(三)岩石力學專長人員與研究領域建立

本所過去欠缺岩石力學研究能量，但在高放深層處置、二氧化碳封存、或電力設備基礎邊坡災害研究均有需要，建議引進此專業之人員。由研討內容可瞭解，岩石力學領域的應域範圍相當廣，相關參數的試驗研究均可擴展成為長期計畫，此類人員對於計畫的完整性，以及整合國內各項研究，以供能源設施評估之需，為不可或缺。

(四)考量老化效應的電廠廠房結構分析研究

建議執行考慮老劣化之土壤結構互制分析，方能掌握既有電廠地震風險。國內外針對核能設施 SSI 的研究相當有限，核能設施的 SSI 工作是不容忽視的。此外，特別針對受材料老劣化影響後的 SSI 結構動力分析研究，乃是獨創且不可或缺的工作，因此，針對老劣化核設施之土壤結構互制分析模擬方法與試驗研究是相當重要的。未來可以核能一級結構建立土壤結構互制分析模型，結合地工離心機模擬試驗與鋼筋腐蝕模擬試驗成果，並將結構老劣化情況導入分析模型中，藉此建立受材料老劣化影響之結構耐震動力分析反應。

五、附 錄

(一)議程

Date	Time						
12 (Sun)	08:30-17:00	Registration					
	09:00-17:00	Workshop					
	09:00-19:00	ISRM Board Meeting (Pearl AB, Level 20)					
13 (Mon)	08:30-19:00	Registration					
	09:00-17:00	Workshops and Short Course					
	09:00-12:30	ISRM Commission Meetings					
	11:00-12:30	ISRM Asian Council Meeting (Yayoi, Level 4)					
	14:00-19:00	ISRM Council Meeting (Royton Hall D, Level 3)					
	18:30-20:30	Welcome Reception (Café Trianon)					
Date	Time	Room A Royton Hall CD	Room B Empress Hall	Room D Highness Hall	Room E Crystal Room A	Room F Crystal Room B	Room C Regent Hall
14 (Tue)	08:00-18:00	Registration					
	08:30-10:10	Opening Ceremony & ISRM Rocha Medal Award Ceremony and Lecture (Room A)					
	10:10-10:30	Coffee Break					
	10:30-11:50	Keynote Lecture A (Room A)					
	11:50-13:00	Lunch (Lounge)					
	13:00-15:00	Rock Properties: Laboratory Tests I	Tunnels and Underground Spaces I	Earthquakes and Rock Dynamics I	Mining Engineering I	Organized session UNPP/URL	Poster session 15:00-16:00 Core time of Poster Session with Coffee and Tea
	15:00-16:00	Coffee Break, Core time of Poster Session (Room C)					
	16:00-18:00	Rock Properties: Flow, Transport, Geochemistry	Carbon Dioxide Capture and Storage	Slope Stability I	Mining Engineering II	Organized session DDA/MM	
	18:00-19:00	Exhibition Kickoff Party					
18:10-	Students' Night						
15 (Wed)	08:30-10:00	Rock Properties: Laboratory Tests II	Tunnels and Underground Spaces II	Earthquakes and Rock Dynamics II	Slope Stability II	Petroleum Engineering I	Poster session
	10:00-10:15	Coffee Break					
	10:15-12:15	ISRM Franklin lecture and Keynote Lecture B (Room A)					
	12:15-13:30	Lunch (Lounge)					
	13:30-15:30	Rock Properties: Non-destructive Methods	Field Measurements and Tests I	Mining Engineering III	Radioactive Wastes, Coupled Processes I	Organized session Rock Engineering Risk	
	15:30-16:00	Coffee Break					
	16:00-17:30	Rock Properties: Laboratory Tests III	Tunnels and Underground Spaces III	Earthquakes and Rock Dynamics III	Radioactive Wastes, Coupled Processes II	Petroleum Engineering II	
	18:30-21:00	Banquet (Lounge) *Welcome cocktail will be served from 18:00.					
16 (Thu)	08:30-10:00	Rock Properties: Modeling	Tunnels and Underground Spaces IV	Earthquakes and Rock Dynamics IV	Reservoir Engineering		Site Characterization and Design I
	10:00-10:15	Coffee Break					
	10:15-12:15	Keynote Lecture C (Room A)					
	12:15-13:30	Lunch (Lounge)					
	13:30-15:00	Rock Properties: Numerical Simulations	Tunnels and Underground Spaces V	Field Measurements and Tests II	Risk Management and Disaster Mitigation		Site Characterization and Design II
	15:00-15:30	Coffee Break					
	15:30-17:00	Rock Properties: Specific Themes	Tunnels and Underground Spaces VI	Rock Mechanics at Great Depth			Environmental Aspects of Mining and Construction Engineering
17:10-	Closing Ceremony (Room A)						
17 (Fri)	07:00-	Technical Tour					
18 (Fri)	-18:45	Technical Tour					

(二)北海道大學簡介摘錄



歴代工学部長・工学研究科長・工学研究院長・工学院院长
Previous Deans

工学部長

Deans of the Faculty of Engineering

吉 町 大 一	Tsukushi Yoachimachi	大正13.9.26 ~ 昭和6.6.30	September 26, 1924 ~ June 30, 1931
岡久津 国造	Kunio Okata	昭和6.7.1 ~ 昭和8.6.30	July 1, 1931 ~ June 30, 1933
清 次 義 一	Giichi Shimizu	昭和8.7.1 ~ 昭和10.6.30	July 1, 1933 ~ June 30, 1935
倉 本 良 夫	Yoshio Kuramoto	昭和10.7.1 ~ 昭和14.4.30	July 1, 1935 ~ April 30, 1939
小 野 静 児	Shizuko Ono	昭和14.5.1 ~ 昭和16.6.30	May 1, 1939 ~ June 30, 1941
小 川 敬 次 郎	Keigo Ogawa	昭和16.7.1 ~ 昭和17.3.31	July 1, 1941 ~ March 31, 1942
井 口 尚 典	Shoiken Ineko	昭和17.4.1 ~ 昭和21.3.30	April 1, 1942 ~ March 30, 1946
大 塚 基 三郎	Mitsuzo Otsuka	昭和21.3.31 ~ 昭和27.3.31	March 31, 1946 ~ March 31, 1952
大 賀 善 二	Shoji Oga	昭和27.4.1 ~ 昭和28.3.30	April 1, 1952 ~ March 30, 1953

工学部長・工学研究科長

Deans of the Faculty of Engineering and the Graduate School of Engineering

大 賀 善 二	Shoji Oga	昭和28.3.31 ~ 昭和31.3.31	March 31, 1953 ~ March 31, 1956
大 塚 基 三郎	Mitsuzo Otsuka	昭和31.4.1 ~ 昭和33.3.31	April 1, 1956 ~ March 31, 1958
遠 藤 善 弘	Yoshihiro Tomoto	昭和35.4.1 ~ 昭和37.3.31	April 1, 1960 ~ March 31, 1962
大 塚 博	Hiroshi Otsuka	昭和37.4.1 ~ 昭和41.3.31	April 1, 1962 ~ March 31, 1966
岡 部 尚 夫	Naofumi Okabe	昭和41.4.1 ~ 昭和43.2.29	April 1, 1966 ~ February 29, 1968
大 野 邦 彦	Kunio Ono	昭和43.3.1 ~ 昭和45.2.28	March 1, 1968 ~ February 28, 1970
大 野 和 孝 (第1期長)	Kazuo Ono (Acting Dean)	昭和45.3.1 ~ 昭和47.4.30	March 1, 1970 ~ April 30, 1972
小 池 寛 一郎 (第2期長)	Yoshiro Koike (Acting Dean)	昭和47.5.1 ~ 昭和48.5.31	May 1, 1972 ~ May 31, 1973
小 池 寛 一郎	Yoshiro Koike	昭和48.4.1 ~ 昭和53.3.31	April 1, 1973 ~ March 31, 1977
青 江 幹 雄	Mitsuo Aoe	昭和52.4.1 ~ 昭和56.3.31	April 1, 1977 ~ March 31, 1981
小 澤 隆 昌	Takamasa Ozawa	昭和56.4.1 ~ 昭和59.3.31	April 1, 1981 ~ March 31, 1983
木 下 重 雄	Shigenori Kinoshita	昭和58.4.1 ~ 昭和61.3.31	April 1, 1983 ~ March 31, 1986
佐 藤 敬 三	Keisaku Sato	昭和61.4.1 ~ 平成 2.3.31	April 1, 1986 ~ March 31, 1990
津 田 邦 二	Yoshihiko Tsuda	平成 2.4.1 ~ 平成 5.3.31	April 1, 1990 ~ March 31, 1993
丹 保 重 仁	Shigenori Niho	平成 5.4.1 ~ 平成 7.4.30	April 1, 1993 ~ April 30, 1995
土 塚 晋 介	Shunsuke Tsuka	平成 7.5.1 ~ 平成 9.3.31	May 1, 1995 ~ March 31, 1997

工学研究科長・工学部長

Deans of the Graduate School of Engineering and the Faculty of Engineering

土 塚 晋 介	Shunsuke Tsuka	平成 9.4.1 ~ 平成10.3.31	April 1, 1997 ~ March 31, 1998
藤 田 尚 一郎	Shoichi Fujiwara	平成10.4.1 ~ 平成13.3.31	April 1, 1998 ~ March 31, 2001
松 田 尚	Naohiko Matsuda	平成13.4.1 ~ 平成15.4.30	April 1, 2001 ~ April 30, 2003
岸 濱 建 夫	Tsunehiko Kishibiki	平成15.5.1 ~ 平成16.3.31	May 1, 2003 ~ March 31, 2004
中 山 信 康	Shinryo Nakayama	平成16.4.1 ~ 平成18.3.31	April 1, 2004 ~ March 31, 2005
三 上 隆	Takashi Mikami	平成18.4.1 ~ 平成22.3.31	April 1, 2006 ~ March 31, 2010

工学研究院長・工学院院长・工学部長

Deans of the Faculty of Engineering, the Graduate School of Engineering and the School of Engineering

高 橋 直 志	Naoshi Takahashi	平成22.4.1 ~ 平成26.3.31	April 1, 2010 ~ March 31, 2014
名 越 昌 幸	Chiyohisa Nago	平成26.4.1 ~	April 1, 2014 ~

目次 Contents

高い声で A Message from the Dean
歴代工学部長・工学研究科長・工学研究院長・工学院院长 Previous Deans

沿革 History	1
組織概要 Organization	5
教育研究体制 Education and Research Structure	7
工学研究科 Faculty of Engineering	
(1) 基幹分野 Core Research Groups	
(2) 寄附分野 Endowed Chairs	
(3) 先進エネルギー・マテリアル融合連携研究センター Center for Advanced Research of Energy and Materials	
(4) 工学系教育開発センター Center for Engineering Education Development	
(5) フロンティア学教育研究センター Frontier Clarity Center	
大学院 Graduate School of Engineering	
(1) 基幹講座 Core Research Groups	
(2) 連携講座 Collaborative Chairs	
産学連携推進 Industry-Academic Collaboration	25
(1) 法人所有特許 Patents	
(2) 委託研究及び民間等との共同研究 Commissioned/collaborative research	
教職員 Staff	26
(1) 教職員 Staff numbers	
(2) 教員数 Teaching staff numbers	
学位授与者数 (博士) Number of Doctoral Degrees Conferred	29
学生数 Number of Students Enrolled	30
(1) 学部 Undergraduate students	
(2) 大学院 Graduate students	
卒業生・修了者就職状況 Graduate Employment Status	34
(1) 学部卒業生の産業就職状況 Employment of graduated undergraduates by industry	
(2) 修士課程修了者の産業就職状況 Employment of graduates from the former Graduate School of Engineering's master's degree programs by industry	
(3) 博士後期課程修了者の産業就職状況 (工学研究科) Employment of graduates from doctoral degree programs by industry (Faculty of Engineering)	
(4) 博士後期課程修了者の産業就職状況 (大学院) Employment of graduates from the present Graduate School of Engineering's doctoral degree programs by industry	
国際交流 International Exchange	38
(1) 研究所・学部間協定他大学 Faculty/Dept.-level Int. Exchange Agreements	
(2) 大学間協定他大学 University-level Exchange Agreements	
(3) 国際留学生数 Number of International Students by Country/Region	
(4) 経費別留学生数 Number of International students by Source of Fund	
予算・外資資金等 Budget, External Funding, etc.	40
(1) 予算 Budget	
(2) 科学研究費助成事業等 Grants-in-Aid for Scientific Research, etc.	
(3) 共同研究費等 Collaborative Research, etc.	
土地・建物 Land and Buildings	40
図書 Library Holdings	40
(1) 図書 Books	
(2) 学術雑誌 Academic Journals	
建物配置図 Building Layout	41
北海道大学札幌キャンパス施設配置図 Hokkaido University Sapporo Campus Map	42

大学院 Graduate Schools

研究組織(教員等組織) Research organization (for faculty members and other staff)	教育組織(学生組織) Educational organization (for students)
工学研究科 Faculty of Engineering	工学院 Graduate School of Engineering
●専攻 Divisions 応用物理学 Applied Physics 有機プロセス工学 Chemical Process Engineering 生物有機高分子 Biotechnology and Macromolecular Chemistry 物質化学 Materials Chemistry 材料科学 Material Science and Engineering 機械宇宙工学 Mechanical and Space Engineering 人間機械システムデザイン Human Mechanical Systems and Design エネルギー環境システム Energy and Environmental Systems 量子工学 Quantum Science and Engineering 人間機械システムデザイン Human Mechanical Systems and Design 環境フィールド工学 Field Engineering for the Environment 北北圏環境工学 Engineering and Policy for Sustainable Environment 建築都市環境デザイン Architectural and Structural Design 空間環境システム Human Environmental Systems 環境工学 Environmental Engineering 持続資源システム Sustainable Resources Engineering 附属エネルギーマテリアル融合創成研究センター Center for Advanced Research of Energy and Materials 工学教育研究センター Center for Engineering Education Development フロンティア化学教育研究センター Frontier Chemistry Center 工学系技術センター(技術員(技術職員)) Technical Center of Engineering (Division of Technical Staff) 共用利用施設等 Joint-Use Facilities	●専攻 Divisions 応用物理学 Applied Physics 材料科学 Materials Science and Engineering 機械宇宙工学 Mechanical and Space Engineering 人間機械システムデザイン Human Mechanical Systems and Design エネルギー環境システム Energy and Environmental Systems 量子工学 Quantum Science and Engineering 環境フィールド工学 Field Engineering for the Environment 北方環境政策工学 Engineering and Policy for Sustainable Environment 建築都市環境デザイン Architectural and Structural Design 空間環境システム Human Environmental Systems 環境工学 Environmental Engineering 持続資源システム Sustainable Resources Engineering 新設化学院 Graduate School of Chemical Sciences and Engineering ●専攻 Divisions 総合化学 Chemical Sciences and Engineering ●コース Courses 分子化学 Molecular Chemistry and Engineering 物質化学 Materials Chemistry and Engineering 生物化学 Biological Chemistry and Engineering
情報科学研究科 Graduate School of Information Science and Technology	
●専攻 Divisions 情報工学 Computer Science and Information Technology 情報エレクトロニクス Electronics for Informatics 生命人類情報科学 Bioengineering and Biobionomics メディアネットワーク Media and Network Technologies システム情報科学 Systems Science and Informatics	

5

HOKKAI
UNIVERSITY

工学部 School of Engineering

教育組織(学生組織) Educational organization (for students)
工学部 School of Engineering
●学科 Departments 応用理工学系学科 Applied Science and Engineering ●コース Courses 応用物理工学 Applied Physics and Engineering 応用化学 Applied Chemistry 応用マテリアル工学 Material Engineering ●学科 Departments 情報エレクトロニクス学科 Electronics and Information Engineering ●コース Courses 情報理工学 Computer Science and Information Technology 電気電子工学 Electrical and Electronic Engineering 生命情報 Bioengineering and Biobionomics メディアネットワーク Media and Network Technologies 電気制御システム Electric Control System ●学科 Departments 機械知能工学科 Mechanical and Intelligent System Engineering ●コース Courses 機械情報 Mechanics and Information 機械システム Mechanical Systems ●学科 Departments 環境社会工学科 Socio-Environmental Engineering ●コース Courses 社会基盤工学 Civil Engineering 国土工学 Public Policy and Engineering 建築都市 Architecture 環境工学 Environmental Engineering 資源管理システム Sustainable Resources Engineering

工学系事務部 Administration Office for Engineering

事務組織 Administrative organizations
事務組織 Administrative organizations
総務課 General Affairs Division 総務部 General Affairs Section 材料化学系分室 Materials Chemical Branch Office 物理・社会工学系分室 Physical/Socio-Engineering Branch Office 人事課 Personnel Section 研究支援担当 Research Support Section 経理課 Accounting Division 経理部 Accounting Section 承認課金部課 Fundraising Section 調達課 Supply Section 管理課 Building Maintenance Section 安全衛生管理担当 Safety and Health Section 教務課 Academic Affairs Division 学部部 Undergraduate School Section 大学院部 Graduate School Section 学生支援部 Student Support Section 工学系教育研究センター事務局 Center for Engineering Education Development Section 就職企画課 Administration Section for Employment Planning 国際企画課 International Affairs Office 情報科学研究科事務局 Administrative Division of the Graduate School of Information Science and Technology 総務担当 General Affairs Section 会計担当 Accounting Section 教務担当 Academic Affairs Section 社会化学院事務局 Administration Office, Graduate School of Chemical Sciences and Engineering 総務担当 General Affairs Section 教務担当 Academic Affairs Section 事務組織 Administrative organizations 図書室 Library 中央図書部 Central Library Section 材料化学系図書部 Materials Chemical Library Section 物理工学系図書部 Physical Engineering Library Section 社会工学系図書部 Social Engineering Library Section 情報科学研究科図書部 Graduate School of Information Science and Technology Library Section

HOKKAI
UNIVERSITY

6

平成26.5.1現在

部門	分野	研究室	教員	研究分野
工学部	水圏環境工学	水工・水文学	教授 志保 内 准教授 木村 一 郎	水文学、水工学、河川工学、水理学、防災工学
		河川・流域工学	教授 藤 島 高 雄 准教授 山 田 隆 人	河川工学、河川環境工学、水工水理学、水工学系学、大気環境相互作用、地球水循環システム
		沿岸海洋工学	教授 山 下 幸 彦 准教授 渡 邊 浩 司	海岸工学、沿岸環境工学、基地海洋工学、水産工学、水質・海洋環境学、海洋エネルギー学、海洋基礎工学
防災地盤工学	地盤工学	准教授 藤 井 洋 行 准教授 藤 井 行 郎	人工・自然地盤工学、地盤安定・変形の評価・対策、都市防災地盤工学、海岸・沿岸域等のフロンティア地盤開発	
	地盤環境解析学	教授 石 川 進 也 准教授 藤 井 一 郎	海洋地盤工学、地盤環境工学、土・水マルチフィジック大解析、地盤と環境との基礎的相互作用の評価、交通地盤工学	
工学部	東方地盤工学	構造システム	教授 藤 井 望 仁 准教授 佐 藤 大 輔	構造力学、構造力学学、海洋地盤工学
		構造デザイン工学	准教授 林 川 望 雄 准教授 坂 本 尚 志	構造工学、鋼構造学、地震工学、メンブレン工学、軽建工学、マイクロロボティクス、接合材料工学
		維持管理システム工学	教授 上 原 多 門 准教授 佐 藤 尚 志	コンクリート構造学、複合構造工学、耐震工学、維持管理工学、建設リサイクル工学
		ライフタイム工学	教授 藤 井 一 郎 准教授 藤 井 一 郎	ライフタイム工学、ライフサイクルマネジメント、構造物の性能低下、劣化・性状予測、ライフサイクルコスト
		社会基盤計画学	教授 田 村 孝 准教授 内 田 賢 一	社会基盤計画学、国土・地域計画、社会資本制度、都市経済学、政策評価、持続可能性下の意思決定論
工学部	情報環境工学	交通インフラシステム	准教授 中 辻 浩 一 准教授 藤 井 一 郎	交通システム学、交通制御マネジメント、リスク・マネジメント
		建設管理工学	教授 藤 井 一 郎 准教授 藤 井 一 郎	交通計画、都市計画、住居形成支援システム、計画理論学、道路環境、交通情報システム、トライブリアセメント、インフラストラクチャマネジメント、コンストラクションマネジメント、セーフティマネジメント
工学部	空間防災	建築構造工学	准教授 藤 井 一 郎 准教授 藤 井 一 郎	建築構造学、耐震構造学、耐震工学
		建築構造計画学	教授 藤 井 一 郎 准教授 藤 井 一 郎	建築構造学、耐震工学、地震工学、建築構造学、耐震工学
		都市防災学	教授 藤 井 一 郎 准教授 藤 井 一 郎	地震工学、地震防災学、リスクマネジメント、人的被害、防災情報学、地震工学、地震防災学、都市防災学
		防災史学	准教授 小 澤 大 輔	建築構造学、建築設計、都市空間デザイン、建築史、歴史的建築物の保存活用
		建築計画学	教授 藤 井 一 郎	建築計画学、都市計画、環境行動デザイン、ユニバーサルデザイン
工学部	空間計画	都市地域デザイン	准教授 藤 井 一 郎 准教授 藤 井 一 郎	都市計画、都市再生計画、都市環境デザイン、田舎環境学、コミュニティデザイン、都市地域づくり

As of May 1, 2014

Research group	Laboratory	Faculty members		Research fields
		Professor	Associate Professor	
Hydraulic and Aquatic Environment Engineering	Hydraulic Research	Professor Yasuyuki Shimizu	Associate Professor Ichiro Kimura	Hydrology, hydraulic engineering, river engineering, hydraulics, disaster mitigation engineering
	River and Watershed Engineering	Professor Norihiko Izumi	Associate Professor Toruho Yamada	River engineering, river environmental engineering, hydraulics and hydraulic engineering, hydrogeology, atmospheric and interaction, global water cycle system
	Coastal and Offshore Engineering	Professor Takahiko Yamashita	Associate Professor Yasuhiro Hatanaka	Coastal engineering, coastal environmental engineering, coastal engineering in cold regions, farmed engineering, farmed gas turbine, ocean turbulence dynamics, ocean temperature flow analysis
Geotechnical and Material Engineering for Disaster Prevention	Soil Mechanics	Professor Hiroyuki Terayama	Associate Professor Saburo Yamazaki	Soil mechanics, geotechnical engineering, ground stability and deformation, evaluation and countermeasures, urban geotechnical mitigation, offshore and harbor geotechnics development
	Analytical Geomechanics	Professor Takuya Ishikawa	Associate Professor Kouichi Ichio	Fluid geotechnics, seismic geotechnical engineering, soil-water coupling, multiphysics simulation, interaction between soils and foundations, transportation geotechnics
	Environmentals Material Engineering	Professor Takafumi Sugiyama	Associate Professor Takashi Hasegawa	Structural materials engineering, environmental concrete engineering, high-performance concrete structure engineering
Engineering and Policy for Sustainable Environment				
Research group	Laboratory	Faculty members		Research fields
Engineering for Sustainable Infrastructure System	Structural Mechanics and System	Professor Shunji Kojima	Associate Professor Masahito Sato	Structural mechanics, structure dynamics, structural dynamics in cold regions
	Bridge and Structural Design Engineering	Professor Toshiaki Hayashiwa	Associate Professor Takashi Matsunaga	Bridge engineering, steel structure engineering, offshore engineering, maintenance engineering, fracture mechanics, micro-mechanics, composite materials engineering
	Engineering for Maintenance System	Professor Tetsuo Ueda	Associate Professor Takahiro Sato	Concrete structure science, composite structure engineering, seismic engineering, infrastructure engineering, construction recycling engineering
	Lifetime Engineering	Professor Hiroaki Yokota		Lifetime engineering, life cycle management, structural performance estimation, degradation, deformation and durability, life cycle costs
Policy for Engineering and Environment	Infrastructure Planning and Design	Professor Toru Tamura	Associate Professor Kazuhiko Uchida	Infrastructure planning science, national and local regional planning, social capital system, urban economic policy evaluation, theory of decision making under uncertain conditions
	Transportation Infrastructure	Professor Takashi Hatanaka	Associate Professor Kazuhiko Kishi	Traffic safety engineering, traffic control management, risk management
Construction and Maintenance Management	Construction and Maintenance Management	Professor Toru Higashimura	Associate Professor Shinya Takano	Transportation planning, urban planning, public participation, support systems, mathematical models for planning, road landscape, traffic information systems, living government infrastructure planning, construction management, mobility management
	Architectural and Structural Design			
Research group	Laboratory	Faculty members		Research fields
Structural and Urban Safety Design	Structural Engineering	Professor Mitsuru Mikiho	Associate Professor Tachiro Okazaki	Building construction, earthquake-resistant structures, steel structures, earthquake engineering
	Structural Design	Professor Masaru Kikuchi	Associate Professor Kazuhiko Shiki	Seismic isolation structures, seismic engineering, earthquake engineering, environmental vibration, vibration (seismic) control structures, vibration control, shaking table tests
	Urban Disaster Prediction Planning	Professor Shinya Okada	Associate Professor Nobuo Takai	Earthquake engineering, earthquake disaster mitigation planning, risk assessment, human behavior, disaster mitigation information, earthquake engineering, integrated disaster management, urban disaster mitigation science
Human Settlement Design	Architectural History and Design	Associate Professor Takao Ozawa		Architectural design, building design, urban space design, architectural history, preservation and utilization of historical buildings
	Architectural Planning	Professor Suguho Mori		Architectural planning, urban planning, environment-behavior design, urban design
	Urban Design	Professor Takashi Setoguchi	Associate Professor Takao Ozawa	Urban planning, urban regeneration planning, urban and regional design, rural landscape, community design, urban and regional community development

Effect on Dynamic Responses of Material Deterioration in a Scale-down Reinforced Concrete Specimen



Presenter: Dr. Wei-Ting Lin



Date: 10/17/2014



Outlines

- Introduction
- Testing Programs
 - Part 1: RCCV specimen
 - Part 2: RC frame specimen
- Results and Discussion
 - Part 1: RCCV specimen
 - Part 2: RC frame specimen
- Conclusions



Introduction

- Cement-based composite is intrinsically **porous** and may deteriorate or **depredate** as a result of harsh environmental exposure or poor construction quality.
- The static and dynamic structural capacities of RC members were decreased due to the rebar corrosion or degradation of concrete.

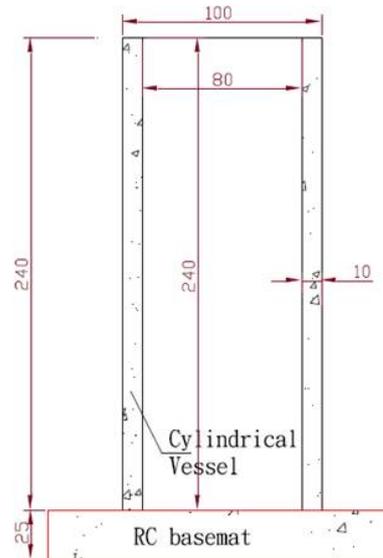


Objectives

- Many previous researchers have studied on the elevation of either seismic capacity or structural safety in concrete containment structure individually; however, few studies have evaluated the effect of material degradation in nuclear related structures.
- To clarify the variation of natural frequency and dynamic responses in a deteriorated scale-down Reinforced Concrete specimen with rebar corrosion.
- Corrosion test, concrete resistivity test, displacement , acceleration and frequency measurement were used and compared in this study.

Testing Programs-Part 1

- 6 Tons RCCV scale-down specimen: The dimension of the basemat was 176 cm length and 25 cm depth, the cylindrical vessel had an outer diameter of 100 cm, a thickness of 10 cm and a height of 240 cm.



Testing Programs-Part 1

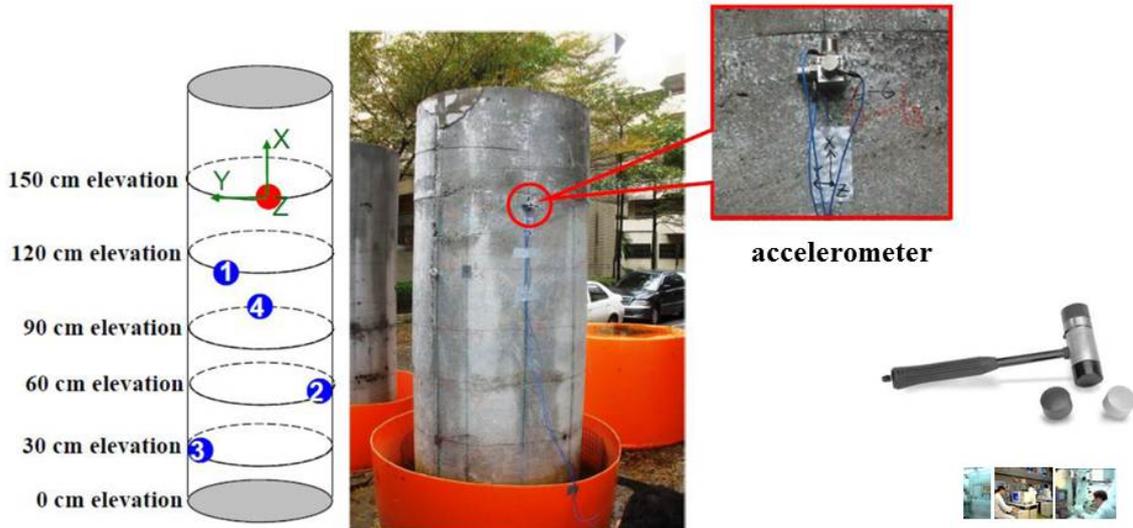
- Testing item and sample

Testing method	Sample	Method
Accelerated corrosion test	Scale-down RCCV specimen	Self-developed Method
Resistivity		Four-probe device
Natural frequency test		impact hammer
Open circuit potential (OCP)		ASTM C876
Corrosion rate		DC Method



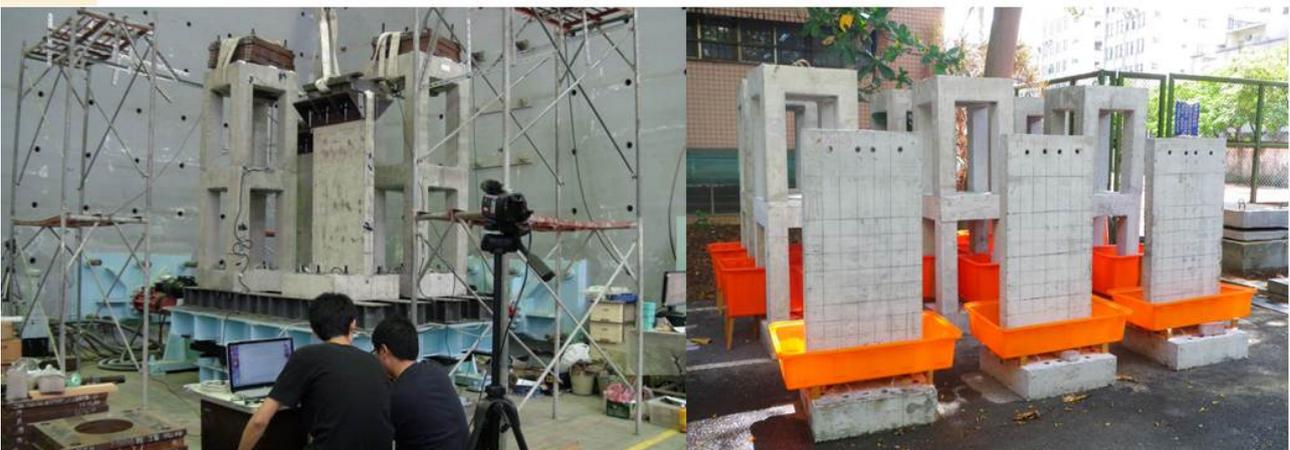
Testing Programs-Part 1

- Natural frequency of RCCV specimen before and after accelerated corrosion test was measured using a Piezotronics Model 086D20 impact hammer



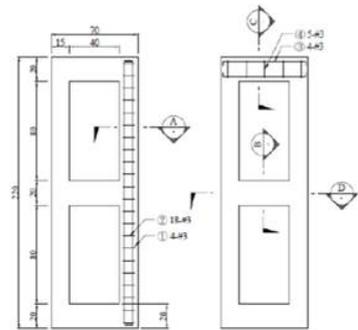
Testing Programs-Part 2

- We will try to understand the effect of the rebar corrosion on the dynamic response using a shaking table test.

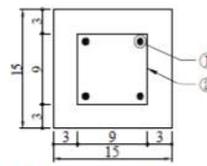


Testing Programs-Part 2

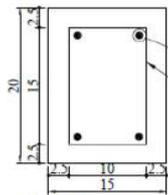
- Scale-down RC frame specimen is 2-stories and structure and the dimension of typical specimen is 220 cm high, 70 cm wide, 70 cm deep and the net weigh is approximately 950 kgf



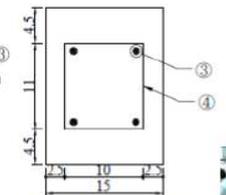
(a) side view



(b) A-A section



(c) B-B section



(d) C-C section

Institute of Nuclear Energy Research

Testing Programs-Part 2

- The RC frame specimens were connected to the shaking table and the shaking table has 2 degree of freedom system with a frequency range between 0.1~50 Hz and the maximum specimen weight is 6 tons. In addition, the maximum acceleration for lateral and longitudinal is 0.9 g and 1.0 g

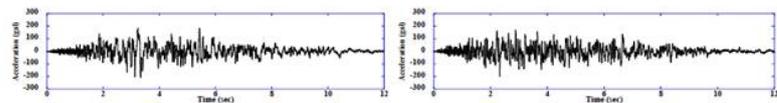


Fig. 5. Acceleration time histories curves (PGA=200 gal)

Table 1. Testing programs

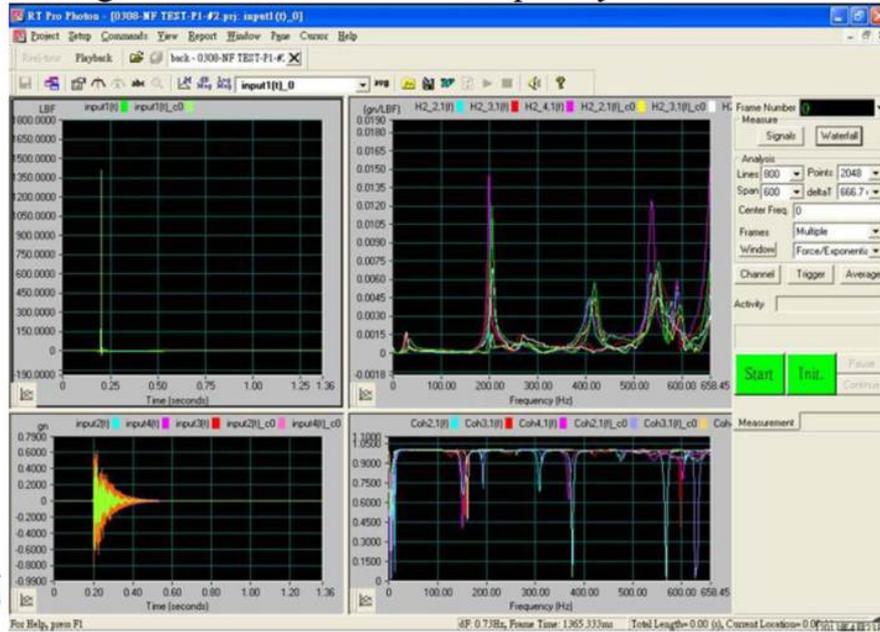
Case	Input motion	Test program	
		X-Direction (NS)	Y-Direction (EW)
		Peak Ground Acceleration (g)	
Test 1	White noise-X	0.05	0.05
Test 2	White noise-Y		
Test 2	N-S test	0.60	
Test 3	E-W test		0.60
Test 3	Two direction test	0.60	0.60

Institute of Nuclear Energy Research



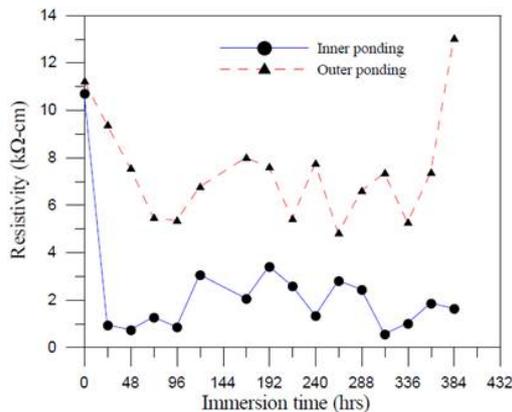
Effect on Rebar Corrosion of RCCV

- the natural frequencies of modes at the frequency range from 0 to 500 Hz were obtained from the peak values of the recorded natural frequency spectra

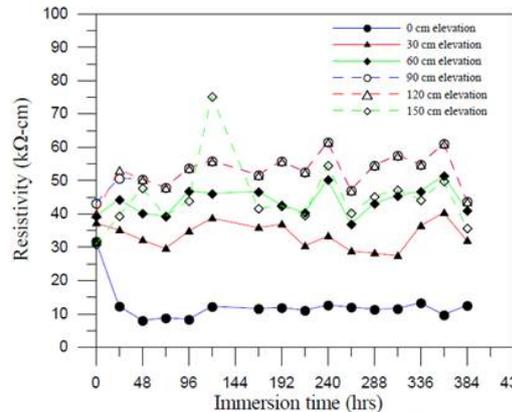


Effect on Rebar Corrosion of RCCV

- Resistivity versus Immersion time curves
 - The basemat with a resistivity between 10 and 20 kΩ-cm was like to be a high corrosion rate
 - The vessel specimen above 30 cm elevation had a higher resistivity exceeded 20 kΩ-cm, which indicated the lower corrosion rate occurred in those zones.



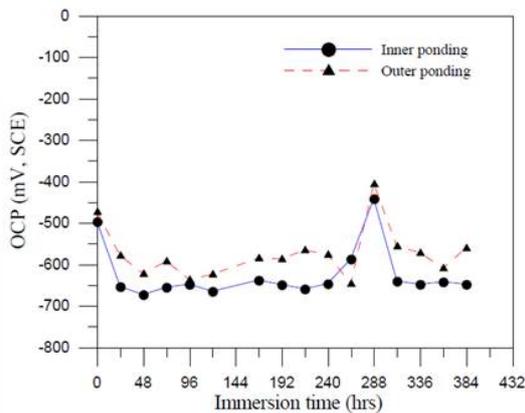
(a) basemat



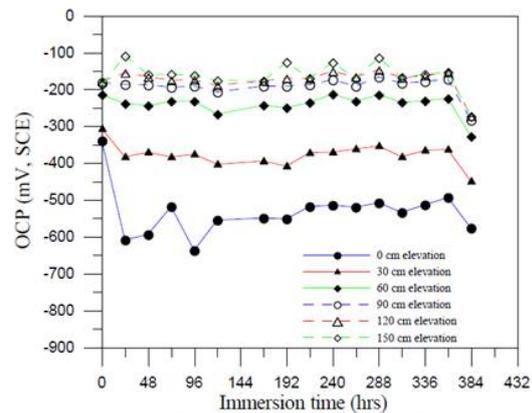
(b) cylindrical vessel

Effect on Rebar Corrosion of RCCV

- Corrosion Potential (OPC) versus Immersion time curves
 - OCP curves of the RCCV basemat dropped rapidly over -450 mV and heightend the corrosion probability of reinforcing steel.
 - OCP of the measuring point at 0 cm elevation dropped rapidly from -300 mV to -600 mV and cracks on the surface of the concrete can be found.



(a) basemat

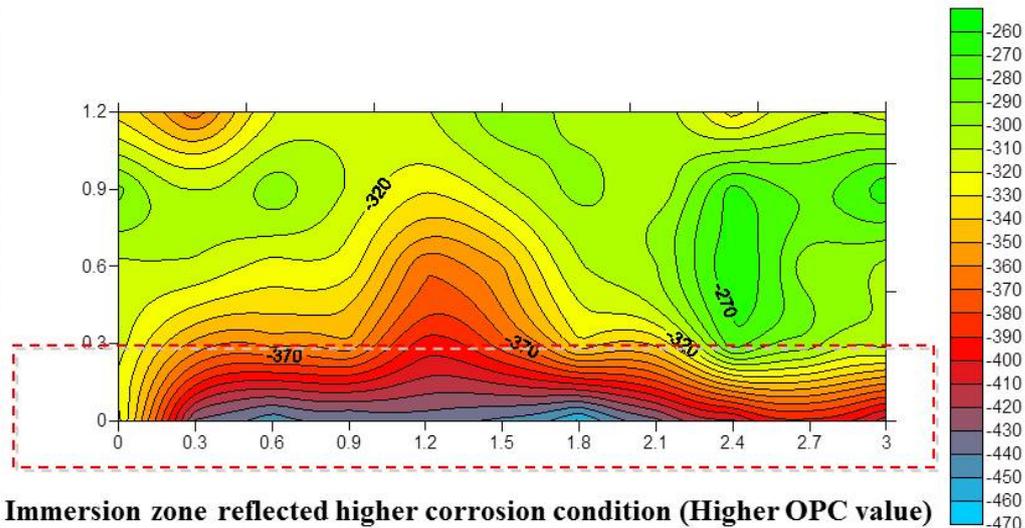


(b) cylindrical vessel



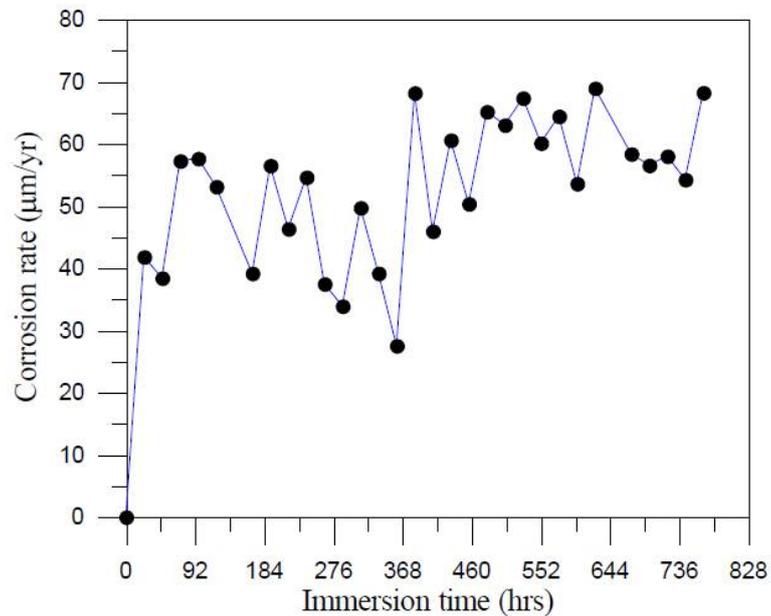
Effect on Rebar Corrosion of RCCV

- Corrosion Potential (OPC): exploded view of the vessel zone



Effect on Rebar Corrosion of RCCV

- Corrosion rate: The corrosion rate increased significantly with an increase in accelerated immersion time and reached steady value up to 70 $\mu\text{m}/\text{yr}$.



Effect on Rebar Corrosion of RCCV

- Natural frequency: rebar corrosion of the scale-down RCCV specimen caused slight changes to the natural frequencies and structural capacity. (Natural frequency \rightarrow reduce)

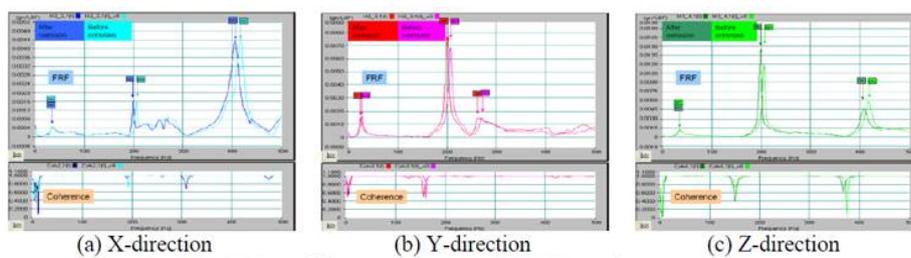


Fig. 9. Natural frequency spectra of RCCV specimen at point 1

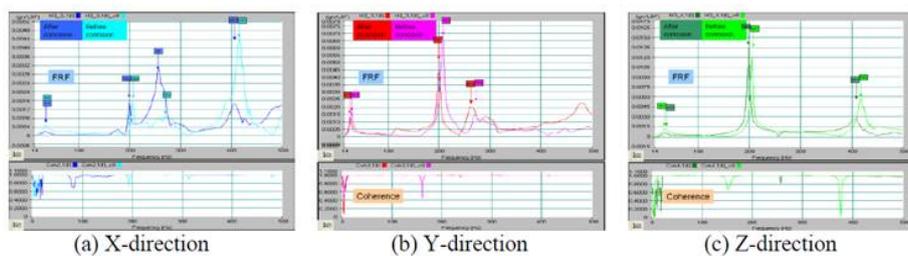


Fig. 10. Natural frequency spectra of RCCV specimen at point 2

Effect on Rebar Corrosion of RCCV

- Natural frequency: The trend of the magnitude of the percentage change in natural frequencies increased with the higher modes.

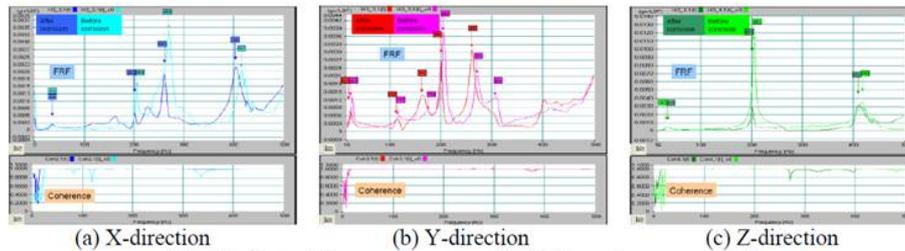


Fig. 11. Natural frequency spectra of RCCV specimen at point 3

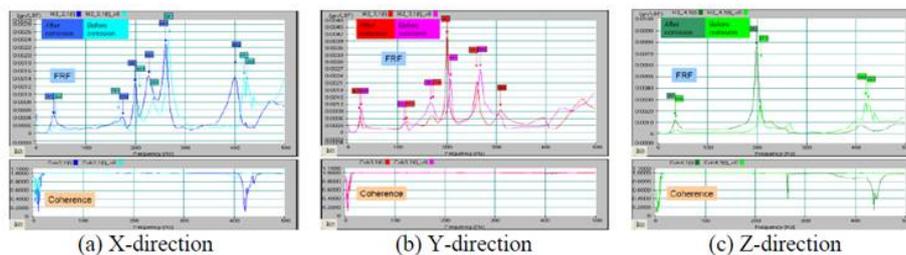
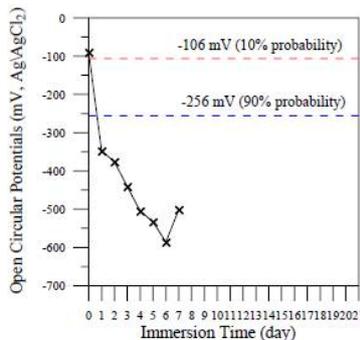


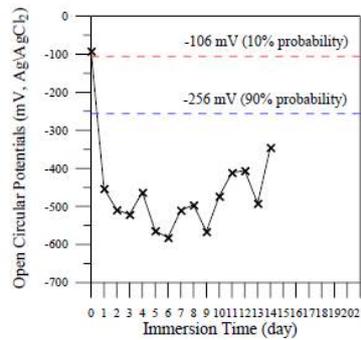
Fig. 12. Natural frequency spectra of RCCV specimen at point 4

Effect on Rebar Corrosion of RC frame

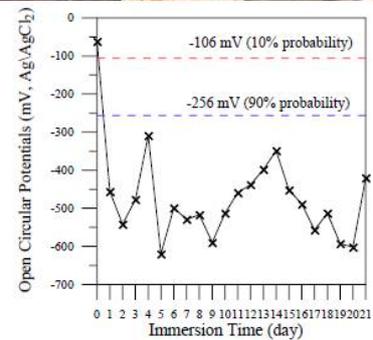
- The potentials dropped again up to -600 mV and the specimens had an active effect on accelerated progression toward active potentials. The significant cracks, rust and rusty spots were observed on the surface of the RC specimens



(a) accelerated time = 7 days



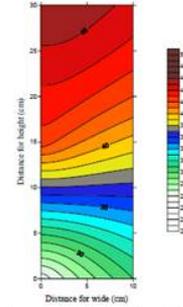
(b) accelerated time = 14 days



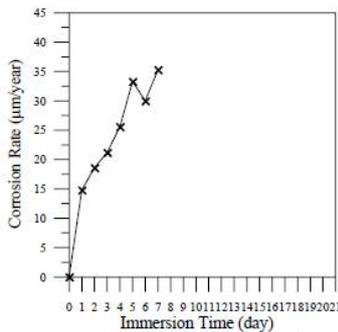
(c) accelerated time = 21 days

Effect on Rebar Corrosion of RC frame

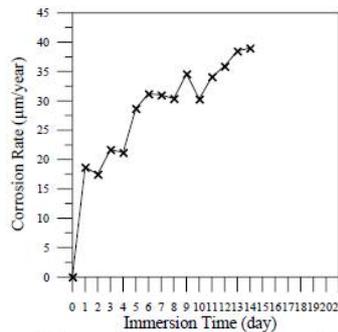
- The corrosion rate increased significantly with an increase in accelerated immersion time and reached steady value up to $40 \mu\text{m}/\text{year}$ of the specimens at the accelerated time of 21 days.
- The corrosion rate increase with the height increase because the lower part of the specimen filled with NaCl solution and the superstructure was in the intertidal zone (tidal zone).



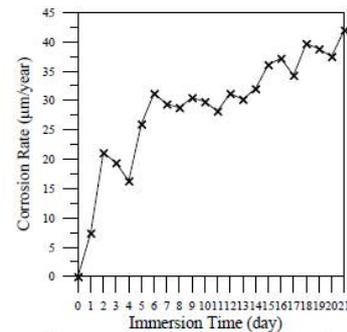
2D plot of corrosion rate values (Accelerated time = 21 days)



(a) accelerated time = 7 days



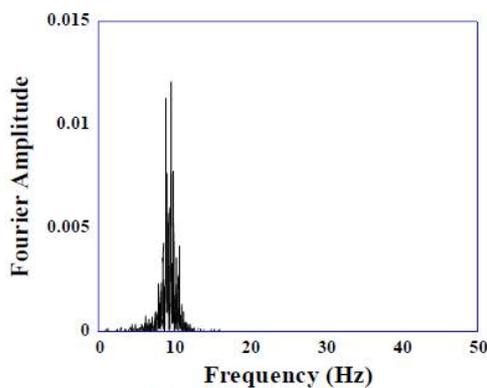
(b) accelerated time = 14 days



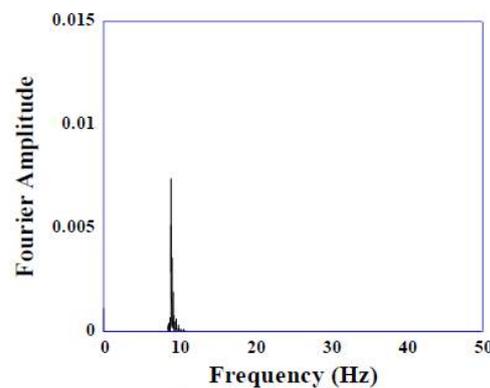
(c) accelerated time = 21 days

Effect on Rebar Corrosion of RC frame

- The natural frequency of 1st mode in non-corroded and corroded specimen was 9.62 and 8.89 Hz. It was also observed in general the trend of the magnitude of the percentage change in natural frequencies decreased with the corrosion rate increased.



(a) non-corroded specimen



(b) corroded specimen



Effect on Rebar Corrosion of RC frame

- It indicated that the rebar corrosion caused an increase in the maximum displacement. The maximum displacement for two direction test was lower than one direction test because the values may be misled by interaction effect.

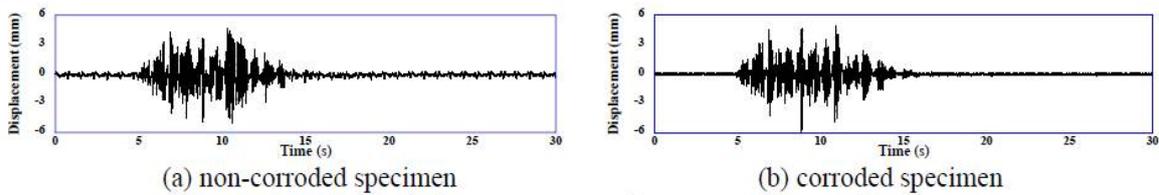


Fig. 11. Displacement versus time curves ($a=0.60$ g)

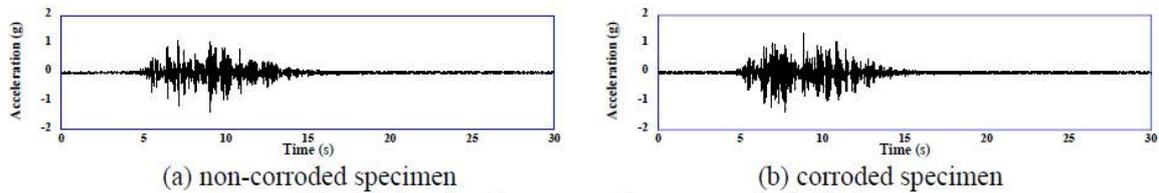


Fig. 12. Acceleration versus time curves ($a=0.60$ g)

Effect on Rebar Corrosion of RC frame

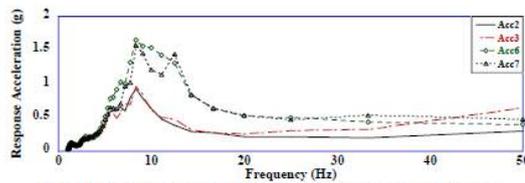


Fig. 13. Response acceleration versus frequency curves ($a=0.20$ g)

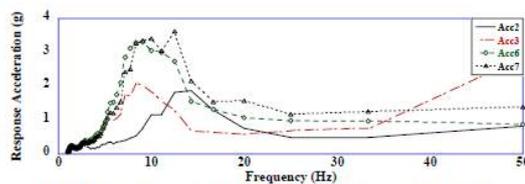


Fig. 14. Response acceleration versus frequency curves ($a=0.40$ g)

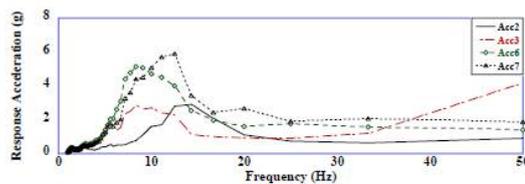
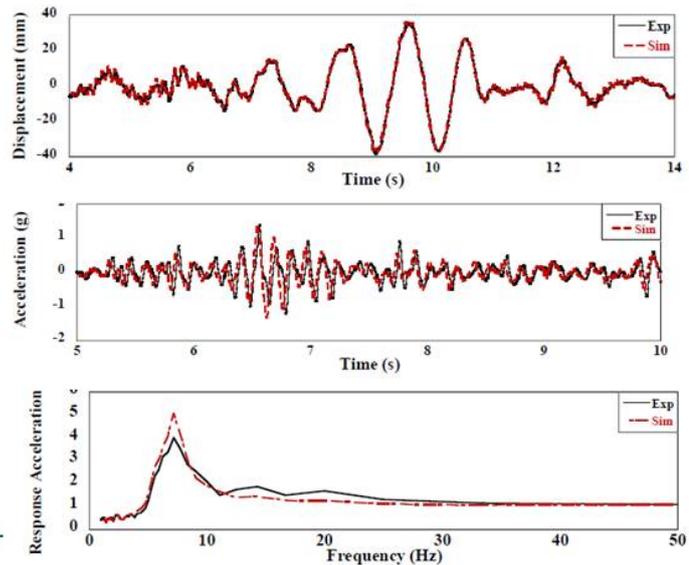
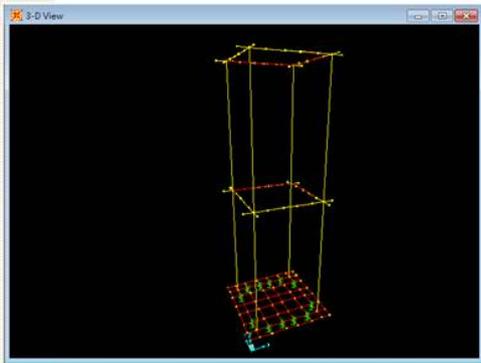


Fig. 15. Response acceleration versus frequency curves ($a=0.60$ g)

- The peak of spectral response curves in the corroded specimens tended towards larger response acceleration than those in the non-corroded specimens and it was especially significant to the specimens at the peak ground acceleration of 0.60 g. Therefore, the corroded RC frame specimens had larger dynamic response and were consistency with the results of displacement, acceleration measurement and corrosion test.

Effect on Rebar Corrosion of RC frame

- Comparison of measured and calculated results demonstrate that the suggested SAP 2000 numerical model is satisfactory and can thus be further used for numerical shaking table tests and numerical analysis of real life structures..



Conclusions

- The accelerated corrosion method and impact hammer test is suitable for evaluating the corrosion behavior of the scale-down RCCV and RC frame specimens.
- The specimen in ponding zones with NaCl solution had lower resistivity, greater corrosion probability and higher corrosion rate compared to the specimen without corrosion.
- Rebar corrosion caused slight changes in natural frequencies and the variations of the natural frequencies increased with the higher modes.
- Test results indicated that the corroded specimens had greater corrosion probability, higher corrosion rate, lower frequency, larger displacement, larger acceleration and higher peak of spectral response curve compared to the non-corroded specimen.

