

公務出國報告
(出國類別：研習)

經濟部 99 年度臺加技術合作訓練計畫
「大規模岩坡的山崩潛勢判釋與危險度評估」
研習報告

出國人員服務機關：經濟部中央地質調查所

出國人員職稱：技士

姓名：林錫宏

出國地區：加拿大

出國期間：民國 99 年 10 月 15 日至 11 月 16 日

報告日期：民國 99 年 12 月

摘要

本研習計畫是以加拿大歷史中最大的山崩災害--亞伯達省法蘭克岩體滑動區(Frank slide, Alberta)為主要研習對象，藉由觀摩學習大規模岩坡的山崩潛勢區判釋與危險度評估方法，進而將這方面的經驗，改善與強化臺灣的坡地安全及環境地質問題(如山崩、落石及土石流等)，並設法研析出高山聚落地區附近嚴重的山崩潛勢區。為達成學習與交流的目標，本計畫的研習內容主要包括山崩機制分析、遙測與觀測科技應用及案例探討等，並擬透過與政府部門及學術單位進行雙向溝通，進行學習及技術交流，汲取山崩調查科技新知與公務單位的施政策略。本計畫的主要研習機構，包括加拿大亞伯達省地質調查所及卑詩大學，期能引進山崩判釋及危險度評估的新觀念，做好政府部門面對下一個莫拉克颱風的準備。

本研習計畫主要研習目標及項目包括：**(1)**提升山崩判釋技術及應用：分析山崩機制、地形分析、地質構造及岩體變形徵兆，模擬岩體滑動影響範圍；**(2)**強化新时期觀測科技及研發：應用遙測技術、現地觀測科技及數值模擬方法，規劃山崩預警系統；**(3)**推動山崩防災策略及檢討：探討臺灣及加拿大的大規模山崩案例及政府施政策略，進行野外考察。

本次研習的內容及成果，可直接落實在經濟部中央地質調查所進行中的相關防災減災基本地質調查研究計畫，對於地質災害的研究分析方面，也提供幾個問題層面，供政府部門在未來進一步來推動，包括：大規模山崩引致土石流及堰塞湖分析、山崩潛勢判釋評估技術引進、監測技術研發、地質災害預警系統強化及防災避難標準作業程序制訂等，以提昇我國於重大山崩災害防治方面的技術。

目 錄

一、目的	1
1.1 前言	1
1.2 研習目標	2
二、研習行程、課題與過程	3
2.1 野外考察亞伯達省法蘭克岩體滑動區	7
2.2 研習亞伯達省法蘭克岩體滑動區山崩判釋及影響區評估	14
2.3 研習亞伯達省法蘭克岩體滑動區的監測及預警系統	17
2.4 研習山崩境況模擬軟體 DAN 3D	24
2.5 研習及野外考察卑詩省海天廊道的地工災害	34
2.6 研習及野外考察亞伯達省愛特蒙頓地區的地工災害	40
2.7 研習亞伯達省公路的地工災害及觀測技術	44
2.8 進行山崩判釋與潛勢評估技術經驗交流	45
三、研習心得	47
四、建議	51
五、參考文獻	53

附錄：本次研習參訪照片

表 目 錄

表 1	本次研習計畫詳細行程表(中英文對照)	3
表 2	本次研習利用 DAN 3D 分析臺灣高雄縣小林村山崩境況模擬之輸入參數表	31
表 3	Harvey Creek 及相關整治設施概要表	38
表 4	Alberta Creek 及相關整治設施概要表	39
表 5	本次研習中向相關單位辦理簡報說明對象列表	45

圖目錄

圖 1	本次加拿大研習行程的主要參訪地點位置圖(底圖取自網路 worldatlas.com)。	7
圖 2	法蘭克岩體滑動區的平面位置圖及剖面圖(Crudén and Krahn, 1978)。	8
圖 3	從直昇機上眺望法蘭克岩體滑動區(攝於 2010 年 10 月 19 日)。	8
圖 4	法蘭克岩體滑動區的地質圖(Langenberg et al., 2007)。	9
圖 5	法蘭克岩體滑動區的地質剖面圖(Langenberg et al., 2007)。	10
圖 6	法蘭克岩體滑動區的側視圖並輔以地層註記(Edmonton Geological Society, 2003)。	10
圖 7	從法蘭克岩體滑動區的山頂向東俯視堆積區(攝於 2010 年 10 月 19 日)。	11
圖 8	從法蘭克岩體滑動區的山頂朝北觀察龜山的西側山麓,可見許多接近南北向的張裂隙(攝於 2010 年 10 月 19 日)。	12
圖 9	在法蘭克岩體滑動區的山頂、龜山的西側山麓上,由亞伯達省地質調查所所設置的 dGPS 監測儀器,即時監測不穩定岩體的位移狀態(攝於 2010 年 10 月 19 日)。此處至少可見 2 處寬度在 1 公尺以上的張裂隙(黃色虛線處)。	12
圖 10	法蘭克岩體滑動區的地面 LiDAR 影像(摘自亞伯達省地質調查所網站),影像右半部即為法蘭克岩體滑動區。黃色虛線處為廢棄煤礦坑道引致的地表下陷,並可能引致南峰及第 3 峰下方的岩體滑動(粉紅色及藍色線範圍)。	13
圖 11	法蘭克岩體滑動解說中心緊鄰岩體滑動的堆積區,崩落的岩塊高度最大可達 3 公尺以上。	13
圖 12	搭乘 BIGHORN 公司的直昇機,前往龜山山頂進行野外考察。	14
圖 13	龜山山頂上 Livingstone 層的石灰岩,黃色虛線約為層理面,岩體並受節理切割顯的破碎。	14
圖 14	龜山山頂上的即時監測設備及資料傳輸裝置。	14
圖 15	亞伯達省地質調查所在龜山山頂上設置的 Web-cam 影像。	14
圖 16	龜山的東側及西側山麓,利用 LiDAR 資料及電腦數值計算判釋後的節理組位態(Pedrazzini et al., 2008)。	15
圖 17	龜山南峰的岩體穩定性受到節理組位態的影響,可能有楔形、傾翻、滑動、下陷及地表張裂等變形現象(摘自 Pedrazzini et al.未發表的簡報資料)。	15
圖 18	龜山南峰及第 3 峰附近共 12 處種可能的岩體滑動破壞範圍圖,估計體積及滑動體摩擦力如右表(Pedrazzini et al., 2008)。	16
圖 19	滑動體積最高的 LSP-2 範圍若發生岩體滑動,數值模擬影響區的範圍	

	(Pedrazzini et al., 2008)。	16
圖 20	龜山地區未來可能發生岩體滑動的最大影響範圍評估結果比較圖，黃色線及紅色線為前期利用簡易評估公式的範圍，綠色線為 DAN 3D 岩崩境況模擬程式的模擬結果(Canadian Geotechnical Society, 2010)。	17
圖 21	龜山南峰及第 3 峰附近的不穩定岩體及監測設備位置圖(Moreno and Froese, 2009)。	19
圖 22	龜山南峰及第 3 峰附近的裂縫計監測成果圖，並與地表溫度(Air_Temp)及岩盤溫度(Instr_Temp，置於孔內 0.2m 處)做比較。	20
圖 23	龜山南峰及第 3 峰附近的岩盤傾斜計監測成果圖，並與地表溫度(Air_Temp)做比較。	21
圖 24	龜山南峰及第 3 峰附近的地表伸張計監測成果圖，並與地表溫度(Air_Temp)及降雨量(Precipitation)做比較。	21
圖 25	龜山南峰及第 3 峰附近的 dGPS 監測成果圖，至 2008 年為止僅有 5 處測站，各測站位移監測成果並區分為南北向(Northing)及東西向(Easting)。	22
圖 26	龜山南峰及第 3 峰附近的全測站反光稜鏡監測成果圖。	22
圖 27	法蘭克岩體滑動區利用 2004 與 2006 年衛星影像進行 InSAR 分析結果(Mei et al., 2008)。	23
圖 28	置於屋頂上的地面干涉合成孔徑雷達(Ground-Based InSAR)掃描設備，每 5 分鐘掃描一次後會自動返回原點，重覆掃描(攝於 2010 年 10 月 18 日)。	24
圖 29	圖示 DAN 3D 以近似流體(equivalent fluid)的處理方式來模擬真實繁複的岩崩或土石流地質狀況。	26
圖 30	利用 DAN 3D 進行亞伯達省法蘭克山崩的境況數值模擬，模擬結果與實際山崩影響區範圍大致吻合。	27
圖 31	相關案例的回饋分析顯示，山崩體積越大者，具有較低的基底阻抗角度，也表示會有更遠的傳輸距離(Hungr Geotechnical Research, 2008)。	28
圖 32	圖示 DAN 3D 以近似流體(equivalent fluid)的處理方式來模擬真實繁複的岩崩或土石流地質狀況。	28
圖 33	利用災前數值地形及災後 LiDAR 地形資料，計算臺灣高雄縣小林村山崩的體積及地表高程變化圖(葉堃生等，2010)。	30
圖 34	小林附近之區域地質圖(上圖)及地質剖面圖(下圖)，主要地層為糖恩山砂岩與鹽水坑頁岩，並有多處斷層及褶皺等地質構造；小林村位於順向坡下方。(黃色線條圈繪出 88 水災山崩之崩塌區範圍；紅色線條圈繪出堆積區範圍)。	30
圖 35	本次研習在山崩源頭區建置的滑動體地形模型圖，寬度約 800 公尺、長度約 1000 公尺，最大深度約 90 公尺。	31
圖 36	利用 DAN 3D 的 friction model，針對臺灣高雄縣小林村山崩境況模擬的歷程，(c)~(f)中黑色線表示該模擬時間 滑動體的影響範圍。(a)山崩前正射影	

	像；(b)山崩後正射影像，紅色線為模擬的滑動體範圍；(c)20 秒；(d)40 秒；(e)60 秒；(f)80 秒；(g)100 秒；(h)120 秒。	32
圖 37	利用 DAN 3D 的 friction model(上圖)及 Voellmy model(下圖)，針對臺灣高雄縣小林村山崩境況模擬的堆積區深度圖。	33
圖 38	卑詩省海天廊道的位置圖(左圖)及歷史山崩災害事件種類及分布圖(右圖，為左圖黃色框線範圍)。	35
圖 39	卑詩省海天廊道在 Brunswick Point 附近，花崗岩順著解壓節理產生平面型岩體滑動。圖左上：2008 年岩體滑動概況，右下角小圖為 1964 年岩體滑動概況；圖左下：2008 年岩體滑動概況；圖右：2008 年部分岩塊產生岩體滑動時被 CBC 新聞所捕捉之畫面。以上照片引用自網路 (http://daveslandslideblog.blogspot.com/2008/08/follow-up-to-sea-to-sky-highway.html)。	36
圖 40	卑詩省海天廊道道路邊坡所設置的防落石網(左)及岩釘(右)，攝於 2010 年 11 月 2 日。	37
圖 41	Harvey Creek 的沈沙滯洪池概況，圖左上及圖左下攝於 1995 年(Couture and VanDine, 2004)，圖右上及圖右下攝於 2010 年 11 月 2 日。	38
圖 42	Alberta Creek 概況，圖左上及圖左下攝於 1995 年(Couture and VanDine, 2004)，圖右上及圖右下攝於 2010 年 11 月 2 日。	39
圖 43	愛特蒙頓 Whitemud 山崩(左圖，摘自網路照片)及其剖面圖(右圖)。	40
圖 44	愛特蒙頓 Grierson Hill 山崩平面圖(上圖)及剖面圖(下圖)(Edmonton Geological Society, 1993)。	42
圖 45	愛特蒙頓 Grierson Hill 山崩經整治後現況，原址並已新設國際會議中心(攝於 2010 年 10 月 27 日)。	43
圖 46	愛特蒙頓 North Saskatchewan 河畔火山灰露頭，可能是美國奧勒岡州 Mazama 火山噴發後的產物(圖左上)。這一層火山灰位於圖右上黃色虛線處，圖左下為露頭近照(粉紅色箭頭處)，圖右下為圖左下中紅色框線放大，火山灰厚度約為 1 公分(攝於 2010 年 10 月 23 日)。	43
圖 47	SAA(ShapeAccelArray)測傾儀概要，主要由每支 50 公分的測傾桿串連所構成(上圖左)，安裝在一般的鑽孔中(上圖右)；照片摘自 measurand 公司網站。下圖為亞伯達省運輸處在 S26 道路邊坡的量測成果。	44

一、目的

1.1 前言

2009 年 8 月莫拉克颱風豪雨成災，在臺灣南部造成重大土砂災害，尤其數個大規模岩石邊坡的山崩及其引致的土砂災害，包括高雄縣小林村山崩、新開及新發村的山崩與土石流及嘉義縣太和與來吉地區的地滑等，均造成嚴重的人員傷亡及經濟損失。這類大規模岩石邊坡的山崩災害案例及機制，無論在世界各地或臺灣，都是相關地質災害專家努力研究的對象。由於大規模岩坡的山崩機制，深受個案的地質及地形狀況影響，不確定因素高，因此如何綜整並強化各項山崩判釋方法與觀測技術，應用在大規模山崩潛勢區，於山崩發生前即能發現並進行診斷分析，進而評估可能的山崩受災地區，以提供土砂災害防治及國土保育規劃上的先期防災基本資訊。

加拿大西部的落磯山脈，由於受到冰河侵蝕下切的影響，地形陡峭，岩層並受變質作用影響導致岩體破碎，也有多處大規模岩坡的山崩案例。加拿大地質調查所、亞伯達省地質調查所及許多學校的山崩判釋與分析專家，均已長期投入研究工作並進行評估分析，期望從地形特徵、岩體變形現象、地質構造及山崩機制分析等方式，在山崩破壞發生前即能判釋出大規模岩坡的山崩位置與可能影響範圍。臺灣在地質架構上屬於快速隆起的造山帶，颱風多雨的環境造成河川快速下切，山區地形陡峭，不僅容易發生像草嶺、九份二山等大規模順向坡的崩塌，在高山地帶變質岩區也容易產生大規模的滑動現象如梨山、廬山等。因此加拿大的大規模山崩判釋與危險度評估經驗，值得學習與技術轉移，並期望透過研習與技術交流的機會，強化我國坡地環境地質防災與調查分析技術，亦能做為臺灣在土砂災害的危險度評估模式。

1.2 研習目標

本研習計畫是以加拿大歷史中最大的山崩災害--亞伯達省法蘭克岩體滑動區 (Frank slide, Alberta) 為主要研習對象，藉由觀摩學習大規模岩坡的山崩潛勢區判釋與危險度評估方法，進而將這方面的經驗，改善與強化臺灣的坡地安全及環境地質問題(如山崩、落石及土石流等)，並設法研析出高山聚落地區附近嚴重的山崩潛勢區。為達成學習與交流的目標，本計畫的研習內容主要包括山崩機制分析、遙測與觀測科技應用及案例探討等，並擬透過與政府部門及學術單位進行雙向溝通，進行學習及技術交流，汲取山崩調查科技新知與公務單位的施政策略。本計畫的主要研習機構，包括加拿大亞伯達省地質調查所及卑詩大學，期能引進山崩判釋及危險度評估的新觀念，做好政府部門面對下一個莫拉克颱風的準備。研習目標及項目包括：

- 1.提升山崩判釋技術及應用：分析山崩機制、地形分析、地質構造及岩體變形徵兆，模擬岩體滑動影響範圍。
- 2.強化新期觀測科技及研發：應用遙測技術、現地觀測科技及數值模擬方法，規劃山崩預警系統。
- 3.推動山崩防災策略及檢討：探討臺灣及加拿大的大規模山崩案例及政府施政策略，進行野外考察。

二、研習行程、課題與過程

本次赴加拿大的研習計畫，感謝由經濟部國際合作處葉士嘉先生與張玉燕小姐、駐加拿大台北經濟文化代表處經濟組宋明豪秘書、經濟部中央地質調查所人事室范惠玫小姐、構地組朱傲祖技正、環工組費立沅組長及紀宗吉科長提供行政支援及技術協助，並感謝亞伯達省地質調查所經理 Corey Froese、研究員 Francisco Moreno 及卑詩大學地球環境系的 Oldrich Hungr 教授細心安排研習內容、單位參訪、野外地質考察及交通運輸等行程。詳細行程如表 1，參訪地點位置如圖 1。

表 1 本次研習計畫詳細行程表(中英文對照)

日期 (Visiting Time)	地點 (Location)	實際訓練進修機構及訪談對象 (Institutions & Persons to be visited)	訓練進修目的及討論主題 (Topics for discussion)
10/15(五)	卡加利 (Calgary)	往程	往程(臺灣時間 10/15 晚上 11:55 出發，經溫哥華轉機，抵達卡加利為加拿大亞伯達省時間 10/16 凌晨 00:43)
10/16(六) 10/17(日)	卡加利 (Calgary)	週末	研習 Frank landslide。
10/18(一)	卡加利 (Calgary)	<ul style="list-style-type: none"> l 亞伯達省地質調查所研究員 Francisco Moreno。 m Francisco Moreno, Geohazards Section, Alberta Geological Survey, Canada. 	<ul style="list-style-type: none"> l 前往位於亞伯達省的 Frank landslide 山崩現場，勘查地面監測站、預警通訊站及山崩監測計畫架構，並前往 Frank Slide Interpretive Center 參觀，瞭解山崩災害歷史。 m Field study of Turtle Mountain Monitoring Project (Frank landslide).
10/19(二)	卡加利 (Calgary)		<ul style="list-style-type: none"> l 搭直昇機前往 Turtle mountain 山頂，勘查各式監測設備，包括氣象站、dGPS、地表伸張計、裂縫計、全測站規標等。 m Field study of Turtle Mountain Monitoring Project (Frank landslide).
10/20(三)	<ul style="list-style-type: none"> 1. 卡加利 (Calgary) 2. 愛特蒙頓 (Edmonton) 	<ul style="list-style-type: none"> l NAVSTAR 公司 Glen Bjorgan 經理；亞伯達省地質調查所研究員 Francisco Moreno。 m Glen Bjorgan, Manager, Field operations, NAVSTAR Geomatics Ltd. Francisco Moreno, Geohazards Section, Alberta Geological Survey, Canada. 	<ul style="list-style-type: none"> l NAVSTAR 公司協助亞伯達省地質調查所進行 dGPS 及全測站測量觀測，討論應用在 Turtle mountain 的經驗。 m Discussion about the monitoring system which is installed by NAVSTAR Geomatics Ltd for Turtle Mountain Monitoring Project.
10/21(四)	愛特蒙頓 (Edmonton)	<ul style="list-style-type: none"> l 亞伯達省地質調查所經理 Corey Froese、研究員 Francisco 	<ul style="list-style-type: none"> l 討論 Turtle mountain 監測計畫及預警系統的標準作業程序。

日期 (Visiting Time)	地點 (Location)	實際訓練進修機構及訪談對象 (Institutions & Persons to be visited)	訓練進修目的及討論主題 (Topics for discussion)
		Moreno。 mCorey Froese and Francisco Moreno, Geohazards Section, Alberta Geological Survey, Canada.	mStudy of the emergency response protocol of Turtle Mountain Monitoring Project in Alberta.
10/22(五)	愛特蒙頓 (Edmonton)	l 亞伯達省地質調查所研究員 Francisco Moreno。 mFrancisco Moreno, Geohazards Section, Alberta Geological Survey, Canada.	l 討論 Turtle mountain 監測計畫及預警系統的軟體設備、通訊應用程式及備援系統。 mStudy of the monitoring software and backup system of Turtle Mountain Monitoring Project in Alberta.
10/23(六) 10/24(日)	愛特蒙頓 (Edmonton)	週末	研習 Turtle mountain 監測計畫。
10/25(一)	愛特蒙頓 (Edmonton)	l 亞伯達省地質調查所經理 Corey Froese、研究員 Francisco Moreno、研究員 James Morgon。 mCorey Froese, Francisco Moreno and James Morgon, Geohazards Section, Alberta Geological Survey, Canada.	l 討論 Frank landslide 的地質調查成果及 little smoky river 的 InSAR 監測技術，並向亞伯達省地質調查所簡報臺灣的地質環境、山崩調查分析及監測成果。 mStudy of geological hazards in Alberta(such as Edmonton urban geohazards, Little Smoky River Landslide..etc), and presentation about the landslide hazards in Taiwan, and discussion about the monitoring system and the hazard assessment of landslides.
10/26(二)	愛特蒙頓 (Edmonton)	l 愛特蒙頓市政府運輸局局長 Don Lewycky 及資深工程師 Paul Lach。 mDon Lewycky and Paul Lach, Engineering services, Transportation, the city of Edmonton.	l 討論愛特蒙頓市區道路邊坡的山崩災害(whitemud road landslide)及廢棄煤炭坑道引致的地盤下陷問題。 mDiscussion about the whitemud road landslide and ground subsidence hazards caused by abandoned coal mine tunnels in Edmonton, Alberta.
10/27(三)	愛特蒙頓 (Edmonton)	l 亞伯達省運輸處運輸及土木組組長 Roger Skirrow 及資深工程師 Rocky Wang。 mRoger Skirrow and Rocky Wang, Geotechnical and Material Service, Transportation and Civil Engineering Division, Government of Alberta.	l 討論亞伯達省運輸處對於道路邊坡的山崩處理對策、整治措施及地工監測經驗。 mDiscussion about the landslide hazards, mitigations and monitoring systems in Edmonton, Alberta.
10/28(四)	愛特蒙頓 (Edmonton)	l 亞伯達大學土木與環工系的 Rick Chalaturnyk 教授、David Cruden 教授、Derek Martin 教授、TaiHoon Kim(ph.D) 及 Renato Macciotta(ph.D)。 mDepartment of Civil and Environmental Engineering,	l 向亞伯達大學土木與環工系地工環境研究群的師生簡報臺灣的地質環境、山崩調查分析及監測成果，並討論山崩分類、監測及滑動機制問題。 mPresentation about the landslide hazards in Taiwan, and discussion about the monitoring system and

日期 (Visiting Time)	地點 (Location)	實際訓練進修機構及訪談對象 (Institutions & Persons to be visited)	訓練進修目的及討論主題 (Topics for discussion)
		University of Alberta.	the hazard assessment of landslides.
10/29(五)	愛特蒙頓 (Edmonton)	l 加拿大地工學會及愛德蒙頓地工 學會合辦之講座：瑞士 Sarah Springman 教授專題演講。 mCGS/CFG 2010 Cross Canada Lecture: Dr. Sarah Springman.	l Springman 教授專題演講題目為： “The Rüdlingen Landslide Experiment”，以瑞士小規模實驗邊 坡為例，討論全尺寸的山崩現象、地 下水及位移監測等實驗成果。 mA large scale field experiment conducted on a steep 38° forested slope with preliminary field monitoring of sensors.
10/30(六)	溫哥華 (Vancouver)	移動及週末	愛特蒙頓早上 11:40 出發(亞伯達省時 間)，至溫哥華為中午 12:11(卑詩省時 間)。
10/31(日)	溫哥華 (Vancouver)	週末	研習 Frank landslide 的山崩影響區。
11/01(一)	溫哥華 (Vancouver)	l 卑詩大學 mUniversity of British Columbia.	l 研習北溫哥華海天廊道(sea-to-sky corridor)的山崩、土石流問題及整治 對策。 mStudy of the landslide and debris flow hazards along the sea-to-sky corridor in Vancouver.
11/02(二)	溫哥華 (Vancouver)	l 溫哥華北岸 mthe north shore in Vancouver.	l 野外考察北溫哥華海天廊道上 Harvey Creek 及 Alberta Creek 的土 石流治理工程，並前往 Caufield 地區 勘查片麻岩及花岡岩地質構造。 mField study of the mitigations in the Harvey Creek and Alberta Creek, and geological studies about the outcrops of gneiss and granite in Caufield, Vancouver.
11/03(三)	溫哥華 (Vancouver)		l 參加「地形學」課程，並研習深層大 規模岩體滑動的機制。 mAttend Professor Hungr's lecture in UBC., and studies of the mechanisms of large scale deep-seated landslide.
11/04(四)	溫哥華 (Vancouver)	l 卑詩大學地球環境系的 Oldrich Hungr 教授 mDr. Oldrich Hungr, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia.	l 參加「工程地質原理」課程，並研習 山崩境況模擬軟體 DAN 3D 及臺灣小 林村山崩的地質架構。 mAttend Professor Hungr's lecture in UBC., and studies of the software “DAN 3D” and cases studies in Taiwan.
11/05(五)	溫哥華 (Vancouver)		l 參加「地形學」課程，並研習 2.研習 山崩境況模擬軟體 DAN 3D 及臺灣小 林村山崩的影響區域。 mAttend Professor Hungr's lecture in UBC., and studies of the software “DAN 3D” and runout area analysis

日期 (Visiting Time)	地點 (Location)	實際訓練進修機構及訪談對象 (Institutions & Persons to be visited)	訓練進修目的及討論主題 (Topics for discussion)
			in ShiaoLin village, Taiwan.
11/06(六) 11/07(日)	溫哥華 (Vancouver)	週末	研習山崩境況模擬軟體 DAN 3D。
11/08(一)	溫哥華 (Vancouver)	I 卑詩大學地球環境系的 Oldrich Hungr 教授 mDr. Oldrich Hungr, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia.	I 研習山崩境況模擬軟體 DAN 3D，探 討該軟體應用在臺灣地質狀況及山 崩案例的問題。 mStudies of the software “DAN 3D” and runout area analysis for landslide cases in Taiwan.
11/09(二)	溫哥華 (Vancouver)		I 研習山崩境況模擬軟體 DAN 3D，並 以高雄縣小林村山崩做範例，探討該 軟體在模擬山崩及土石流運動的問 題。 mStudies of the software “DAN 3D” and runout area analysis in ShiaoLin village, Taiwan. Discussion about the limitations of simulation.
11/10(三)	溫哥華 (Vancouver)	I 卑詩大學地球環境系的 Oldrich Hungr 教授、Keyseok Woo(ph.D)、Philipp Fitze(M. Sc.)；地理系 Marwan Hassan 教 授、Dan Moore 教授及莊永忠研 究員。 mDepartment of Earth and Ocean Sciences and Department of Geography, University of British Columbia.	I 參加「地形學」課程並向卑詩大學地 球環境系及地理系的老師與研究 生，簡報臺灣的地質環境、山崩調 查分析及監測成果。 mAttend Professor Hungr’s lecture in UBC., and Presentation about the landslide hazards in Taiwan.
11/11(四)	溫哥華 (Vancouver)	I 溫哥華的史丹利公園 mStanley Park, Vancouver.	I 野外考察史丹利公園的冰磧土、砂 岩、玄武岩脈等地質構造及山崩災 害現象。註：本日為加拿大國定假 日-國殤日。 mField study of the outcrops of tills, sandstone and basalt dyke in Stanley Park, Vancouver. Today is the Remembrance Day in Canada.
11/12(五)	溫哥華 (Vancouver)	I 卑詩大學地球環境系的 Oldrich Hungr 教授 mDr. Oldrich Hungr, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia.	I 參加「地形學」課程，研習劃設山崩 影響區的實務問題。 mAttend Professor Hungr’s lecture in UBC., and discussions about mapping the runout area of landslide.
11/13(六) 11/14(日)	溫哥華 (Vancouver)	週末	研習山崩境況模擬軟體 DAN 3D 的 Friction model 及 Voellmy model。
11/15(一)	溫哥華 (Vancouver)	返程	返程(加拿大卑詩省時間 11/15 凌晨 00:30 出發，抵達桃園為臺灣時間 11/16 05:45)
11/16(二)	桃園機場	返程	



圖 1 本次加拿大研習行程的主要參訪地點位置圖(底圖取自網路 worldatlas.com)。

2.1 野外考察亞伯達省法蘭克岩體滑動區

亞伯達省法蘭克岩體滑動是加拿大境內百年來最嚴重的山崩災害，地點在加拿大亞伯達省西南側、接近洛磯山脈、人口約 600 人的煤礦聚落。西元 1903 年 4 月 29 日凌晨 4 點 10 分，近 3000 萬立方公尺的石灰岩塊從龜山(Turtle mountain)的山頂崩落，向東覆蓋了部分的法蘭克小鎮，造成 90 人以上的死傷。約在 100 秒內，大量的崩落岩塊，下滑 1000 公尺後並散佈在寬約 1.1 公里、面積達 300 公頃的平原區，最遠達到 1.5 公里外(圖 2、圖 3)，局部地區最高的堆積厚度甚至達到 30 公尺。

龜山的東側山麓上半部岩盤出露處坡度約 60 度，下半部由崩落岩塊構成的崖錐坡度約 30 度，岩體滑動區的寬度約 1000 公尺、高度約 450 公尺、深度估計達 150 公尺。這座龜山的名稱由來，據說是原住民早就觀察到山體如烏龜般的緩慢移動，也就是說岩體滑動的現象實際上已持續了很長的時間。

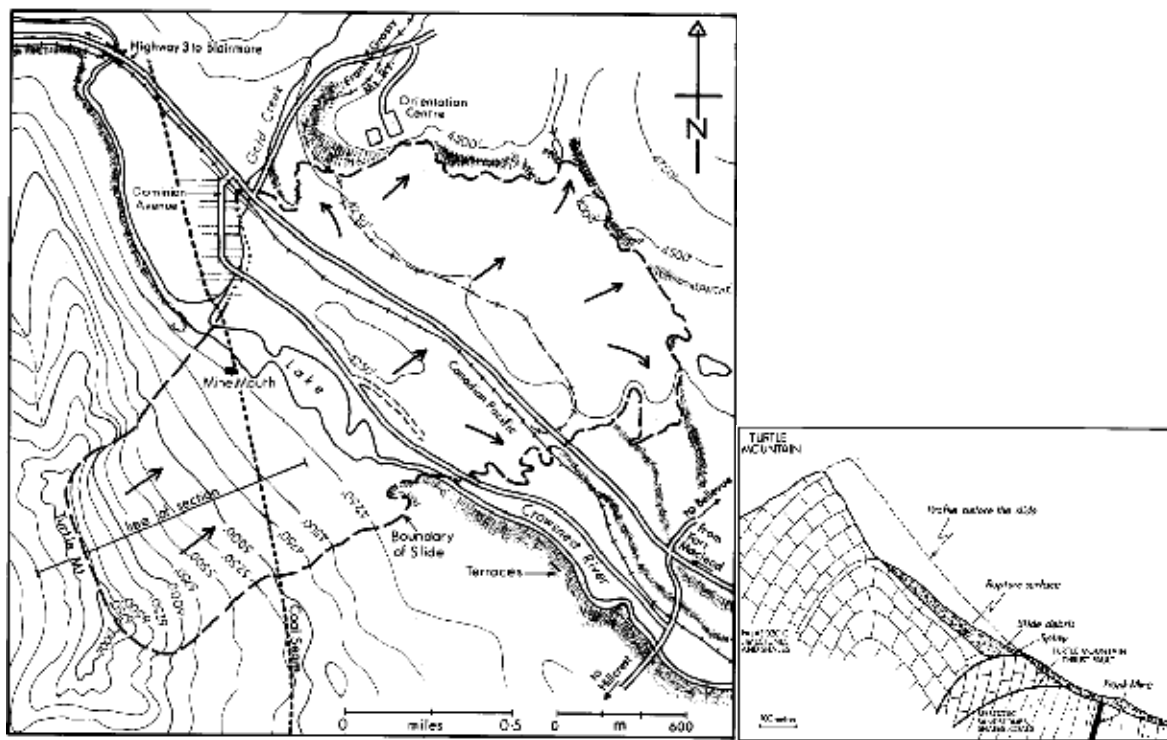


圖 2 法蘭克岩體滑動區的平面位置圖及剖面圖(Crudén and Krahn, 1978)。

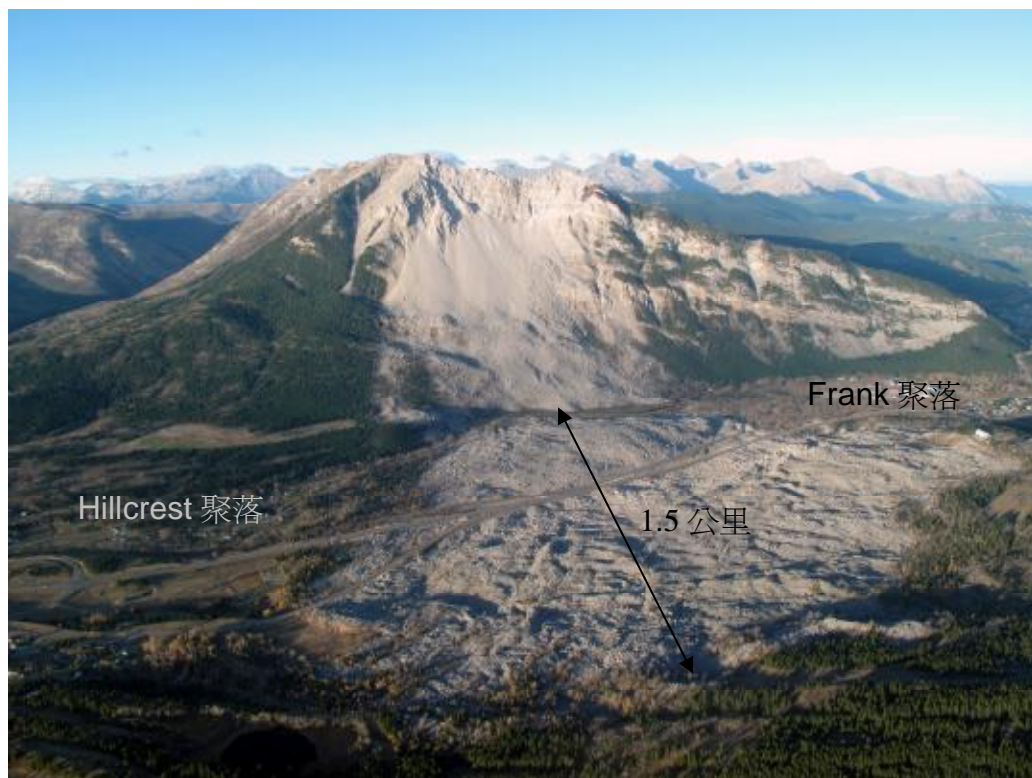


圖 3 從直昇機上眺望法蘭克岩體滑動區(攝於 2010 年 10 月 19 日)。

龜山及附近地區是由古生代至中生代的地層所構成(圖 4、圖 5、圖 6)，包括泥盆紀的 Palliser 層、石炭紀的 Banff 層、Livingstone 層、Mt. Head 層、Etherington 層、Tobermory 層、侏羅紀的 Fernie 層、Kootenay 群及白堊紀的 Blairmore 群 (Langenberg et al., 2007)。龜山山體主要由緊密的背協軸部所構成，東側坡趾處並有 2 條逆衝斷層。構成龜山東側山麓並造成岩體滑動者主要為 Livingstone 層，岩性為灰色塊狀、細到粗粒的結晶石灰岩偶夾白雲岩，地層的層理明顯並有多組節理，常見為粒塊狀的破碎岩體。龜山趾部出露的 Kootenay 群地層中，夾有一層厚約 3-6 公尺、近乎垂直的煤層；Frank 礦場從 1901 年至 1918 年間開採這處煤層，開採深度據說已達地下 1000 公尺。

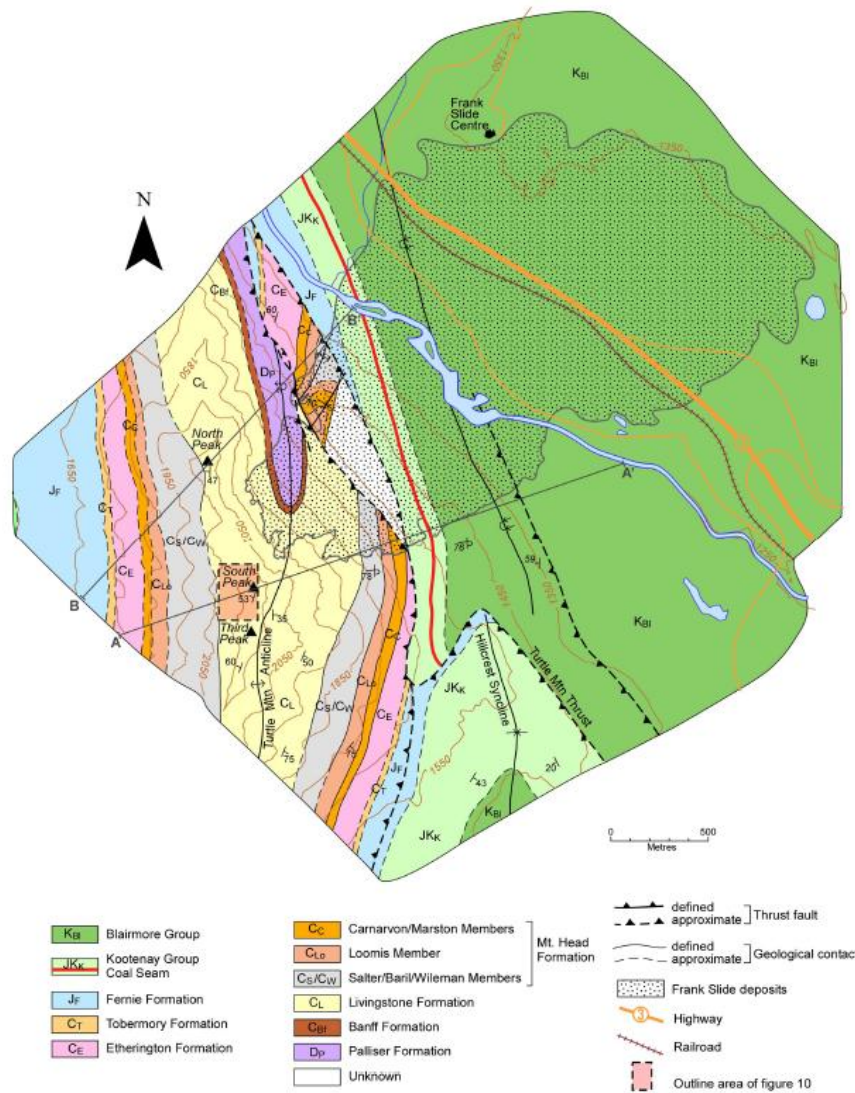


Figure 2. Geological map of the Turtle Mountain area.

圖 4 法蘭克岩體滑動區的地質圖(Langenberg et al., 2007)。

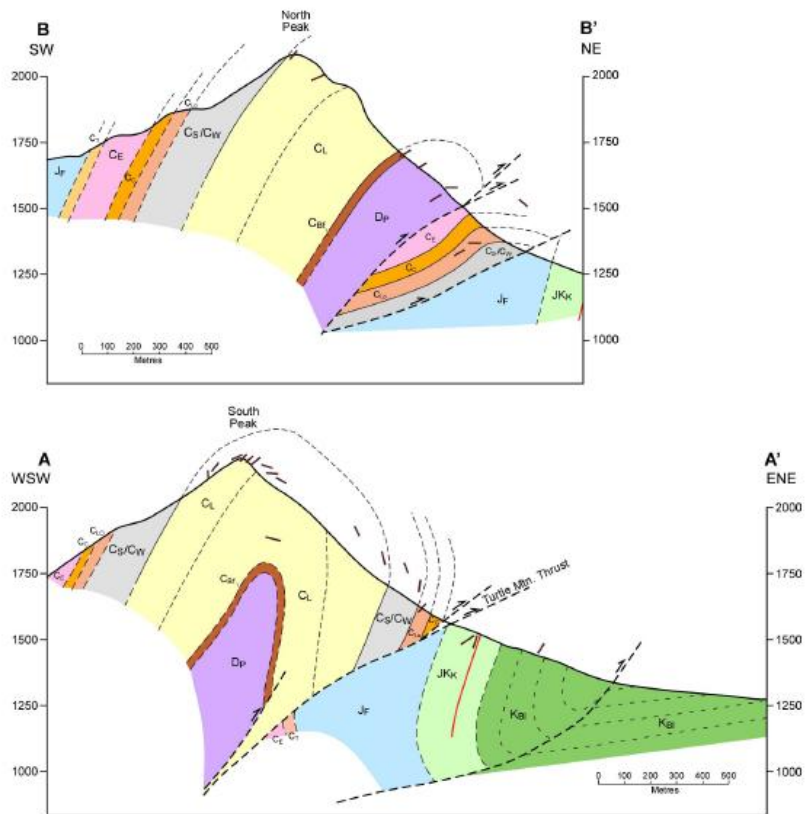


圖 5 法蘭克岩體滑動區的地質剖面圖(Langenberg et al., 2007)。

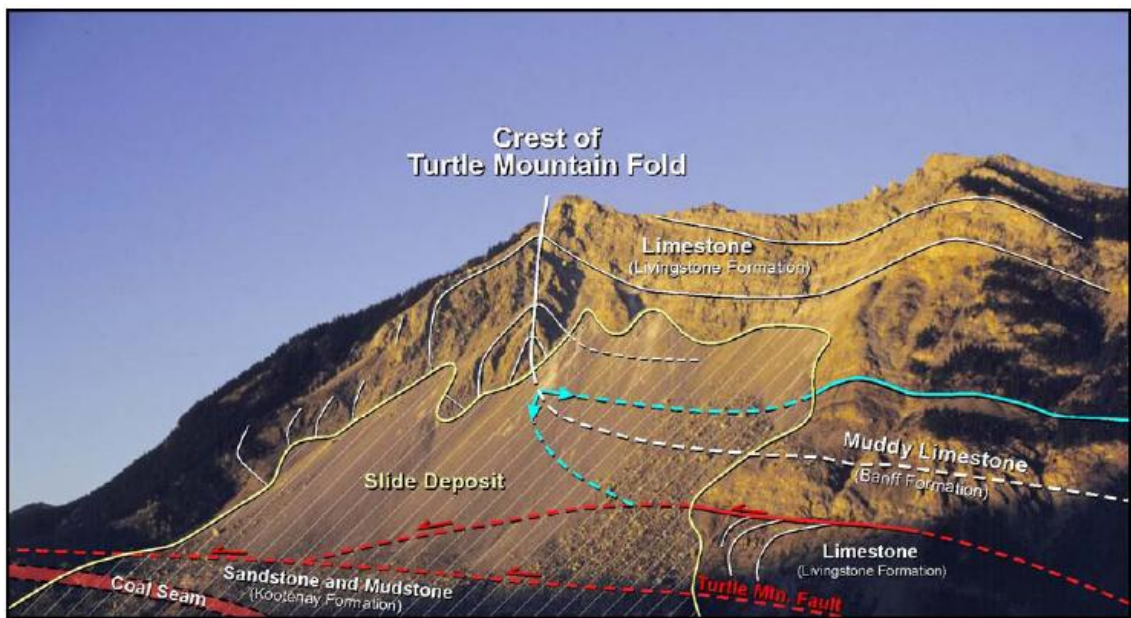


圖 6 法蘭克岩體滑動區的側視圖並輔以地層註記(Edmonton Geological Society, 2003)。

經過近百年來的研究，歸納造成 1903 年法蘭克岩體滑動的因素包括複雜的地質構造(背斜、斷層、節理)、坡趾處煤炭爆破與開採坑道引致的岩體變形、高於平均值的降雨量、岩石裂隙中的水結冰膨脹及頻繁的小地震等。此外，該岩體滑動後崩落的岩塊並未直接堆積在山腳下，而可能受到震動、聲波或流體(空氣、水、塵土)潤滑的影響，降低崩落材料的摩擦力，飛散到相當廣大的範圍。這個機制並未完全被瞭解，但在臺灣的草嶺大山崩或高雄縣小林村山崩事件中，卻也可能扮演相似的角色及影響。

由於龜山稜線上及西側山麓坡面上有許多接近南北向的張裂隙，寬度甚至可達數公尺(圖 7、圖 8、圖 9)；尤其在南峰及第 3 峰下方的岩體，更可能受到過去 Frank mine 廢棄煤礦坑道引致的地表下陷所影響(圖 10)，仍然具有大規模岩體滑動的可能性，對下方聚落造成危害。因此亞伯達省地質調查所(Alberta Geological Survey)的地質師及工程師通力合作，不僅完成高精度的地質調查，並完成岩體滑動監測系統，設置微震儀、地表伸張計、裂縫計、GPS 及相關監測儀器，並制訂監測預警標準作業程序，若有異常現象立即通知亞伯達省能源資源保護局(Energy Resources Conservation Board)進行處置。然而更多的小規模落石及岩屑崩滑現象，不斷在龜山東側坡面上產生；山頂上的許多大裂縫更暗示著岩體持續在潛變、位移，但這些狀況仍無法全然依靠有限的監測設施，達到預警的目標。



圖 7 從法蘭克岩體滑動區的山頂向東俯視堆積區(攝於 2010 年 10 月 19 日)。



圖 8 從法蘭克岩體滑動區的山頂朝北觀察龜山的西側山麓，可見許多接近南北向的張裂隙(攝於 2010 年 10 月 19 日)。

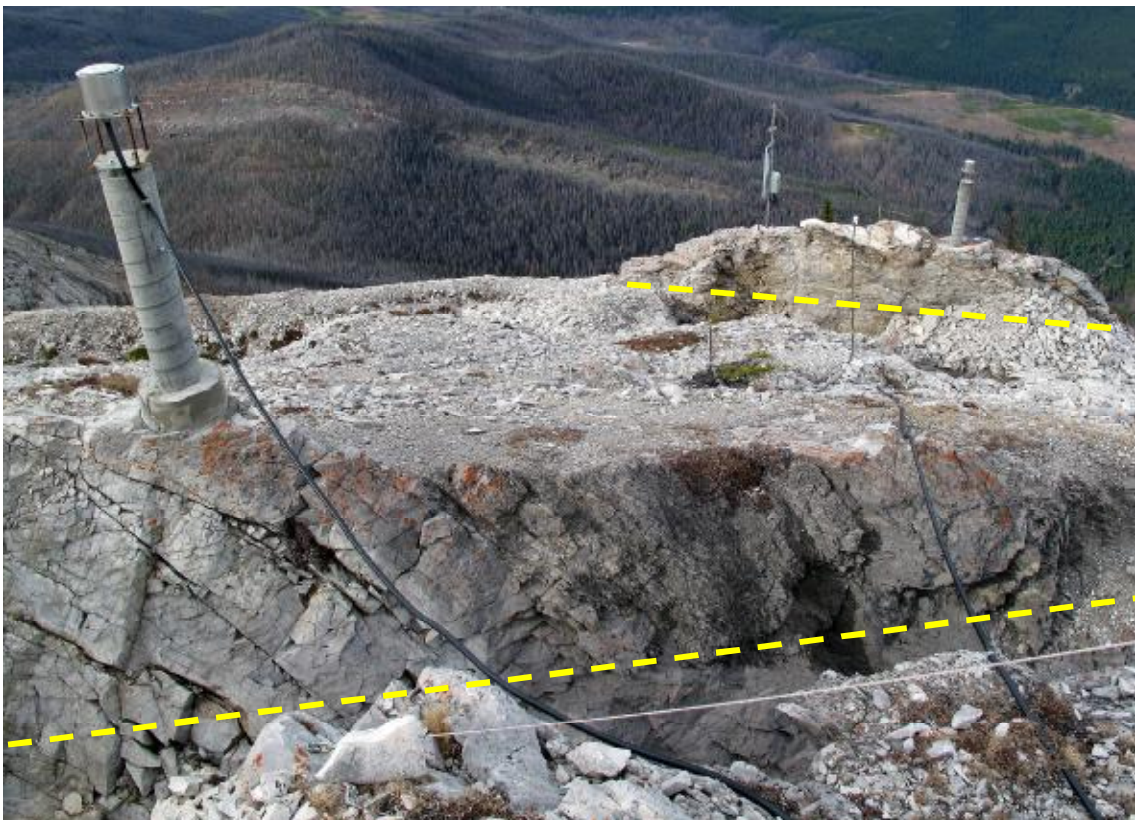


圖 9 在法蘭克岩體滑動區的山頂、龜山的西側山麓上，由亞伯達省地質調查所所設置的 dGPS 監測儀器，即時監測不穩定岩體的位移狀態(攝於 2010 年 10 月 19 日)。此處至少可見 2 處寬度在 1 公尺以上的張裂隙(黃色虛線處)。

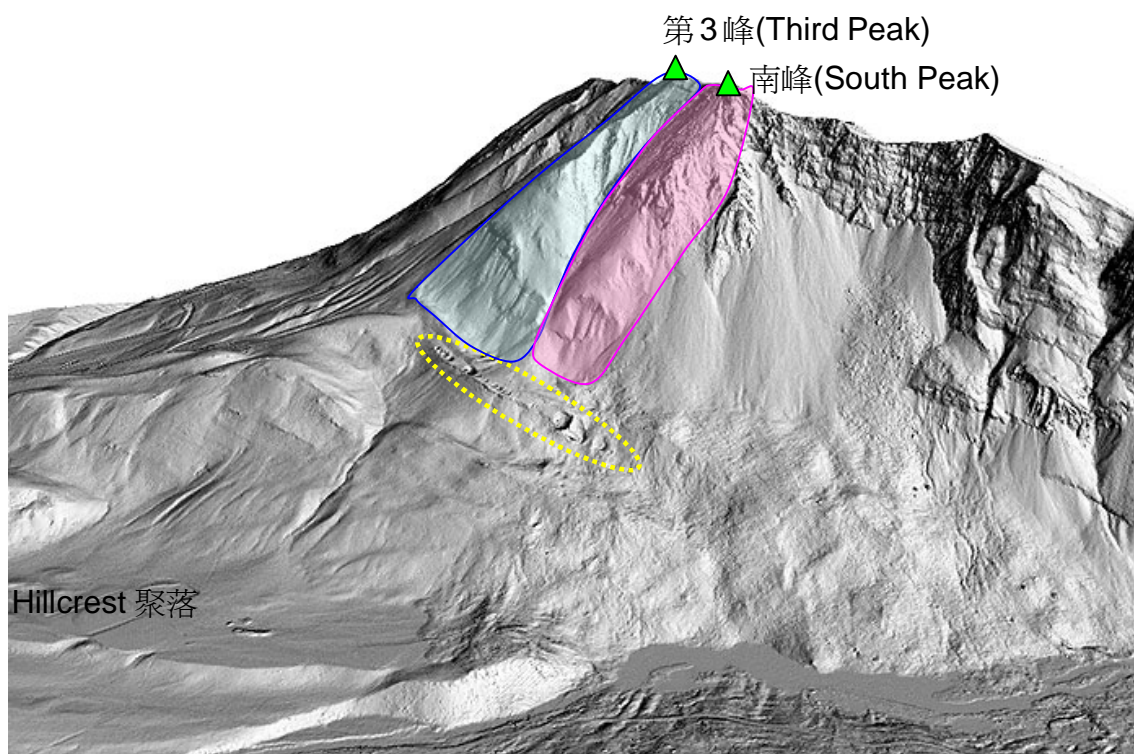


圖 10 法蘭克岩體滑動區的地面 LiDAR 影像(摘自亞伯達省地質調查所網站)，影像右半部即為法蘭克岩體滑動區。黃色虛線處為廢棄煤礦坑道引致的地表下陷，並可能引致南峰及第 3 峰下方的岩體滑動(粉紅色及藍色線範圍)。

在龜山山腳下的法蘭克岩體滑動解說中心(Frank Slide Interpretive Centre)，保留許多這場山崩悲劇的實體與影像紀錄，包括這個煤礦小鎮的興衰歷史、山崩災害解說、地質現象導覽及監測設施介紹，更保留了當時受到山崩摧毀的家俱設施，提醒吾人嚴肅的面對潛在的坡地地質災害(圖 11)。



圖 11 法蘭克岩體滑動解說中心緊鄰岩體滑動的堆積區，崩落的岩塊高度最大可達 3 公尺以上。

本次法蘭克岩體滑動區現場考察，承蒙亞伯達省地質調查所協助，並在天候狀況允下，搭乘 BIGHORN 公司的直昇機直接前往龜山山頂，勘查 Livingstone 層的石灰岩特徵、節理組及監測設備(圖 12-15)。



圖 12 搭乘 BIGHORN 公司的直昇機，前往龜山山頂進行野外考察。



圖 13 龜山山頂上 Livingstone 層的石灰岩，黃色虛線約為層理面，岩體並受節理切割顯的破碎。



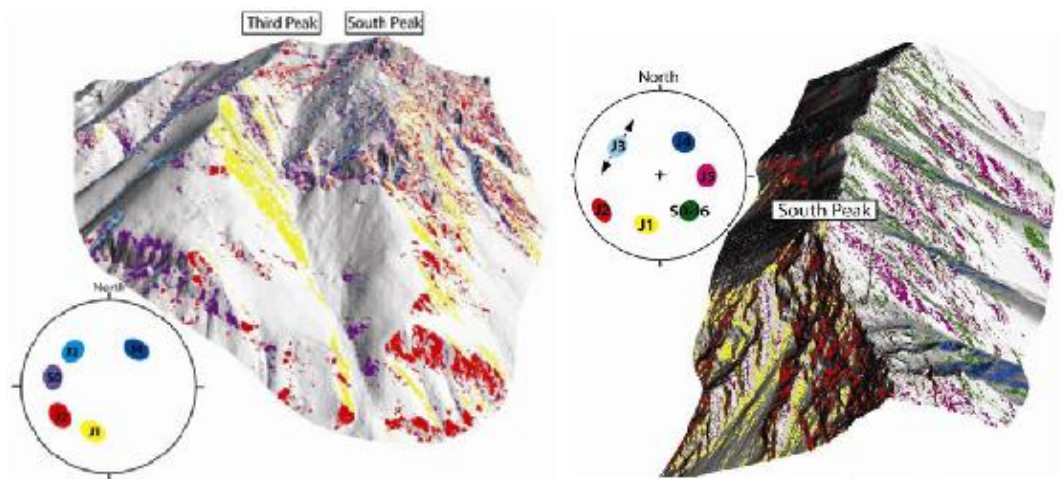
圖 14 龜山山頂上的即時監測設備及資料傳輸裝置。



圖 15 亞伯達省地質調查所在龜山山頂上設置的 Web-cam 影像。

2.2 研習亞伯達省法蘭克岩體滑動區山崩判釋及影響區評估

為瞭解法蘭克岩體滑動區及其南側的龜山南峰、第 3 峰的山崩潛勢，亞伯達省地質調查所與瑞士洛桑大學合作(Pedrazzini et al., 2008)，利用高精度的 LiDAR 資料及地表地質調查，針對龜山的東側及西側山麓，各判釋出 5 組(含層面 S0)及 6 組節理(圖 16)，並經由運動學初步分析，認為龜山南峰的岩體穩定性受到節理組位態的影響，可能有楔形、傾翻、滑動、下陷及地表張裂等變形現象(圖 17)。



Name (color / variation)	Dip direction	Dip
J1 (yellow, +/-10°)	20	45
J2 (red, +/-10°)	60	55
S0 (medium violet, +/-10°)	100	55
J3 (light blue, +/-10°)	135	50
J4 (dark blue, +/-10°)	215	45
J5 (violet, +/-10°)	270	45
J6-S0 (green, +/-10°)	325	45

圖 16 龜山的東側及西側山麓，利用 LIDAR 資料及電腦數值計算判釋後的節理組位態(Pedrazzini et al., 2008)。

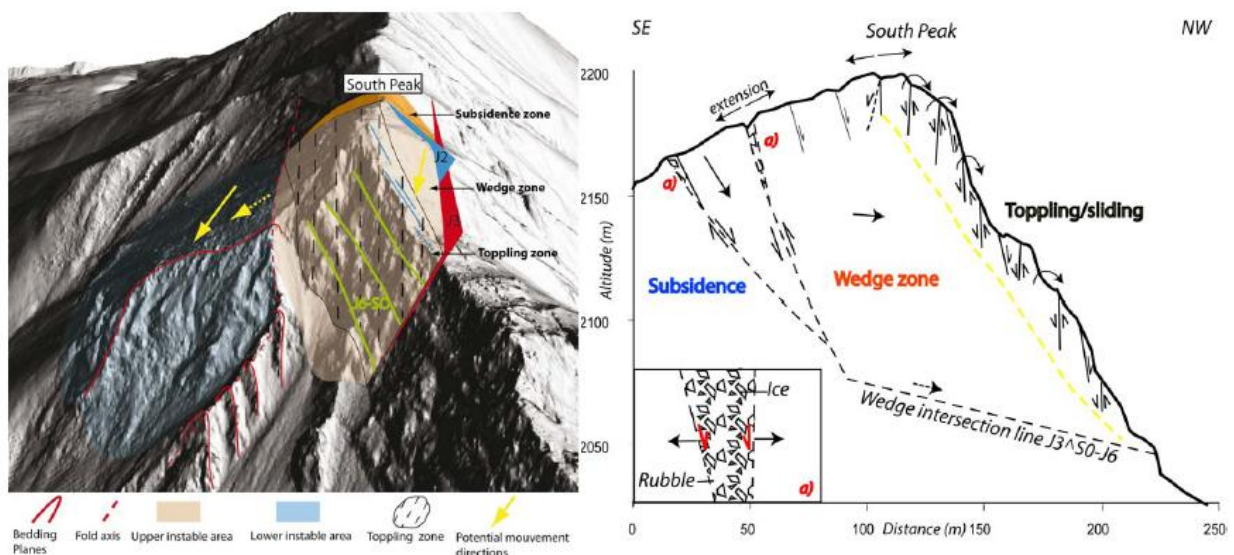


圖 17 龜山南峰的岩體穩定性受到節理組位態的影響，可能有楔形、傾翻、滑動、下陷及地表張裂等變形現象(摘自 Pedrazzini et al.未發表的簡報資料)。

利用電腦分析軟體的協助，龜山南峰及第 3 峰附近共判釋出 12 處種可能的岩體滑動破壞範圍(圖 18)，估計滑動體的體積最高可達 659 萬立方公尺，滑動體摩擦力(bulk friction angle)約在 20~37 度間。亞伯達省地質調查所並與卑詩大學地球環境系的 Oldrich Hungr 教授合作，利用其研發的 DAN 3D 岩崩(rock avalanche)境況模擬程式，研究這 12 種可能的岩體滑動後其影響區範圍。研究結果顯示，若滑動體積最高的 LSP-2 範圍發生岩體滑動，影響區的範圍會最大且最遠(圖 19)。

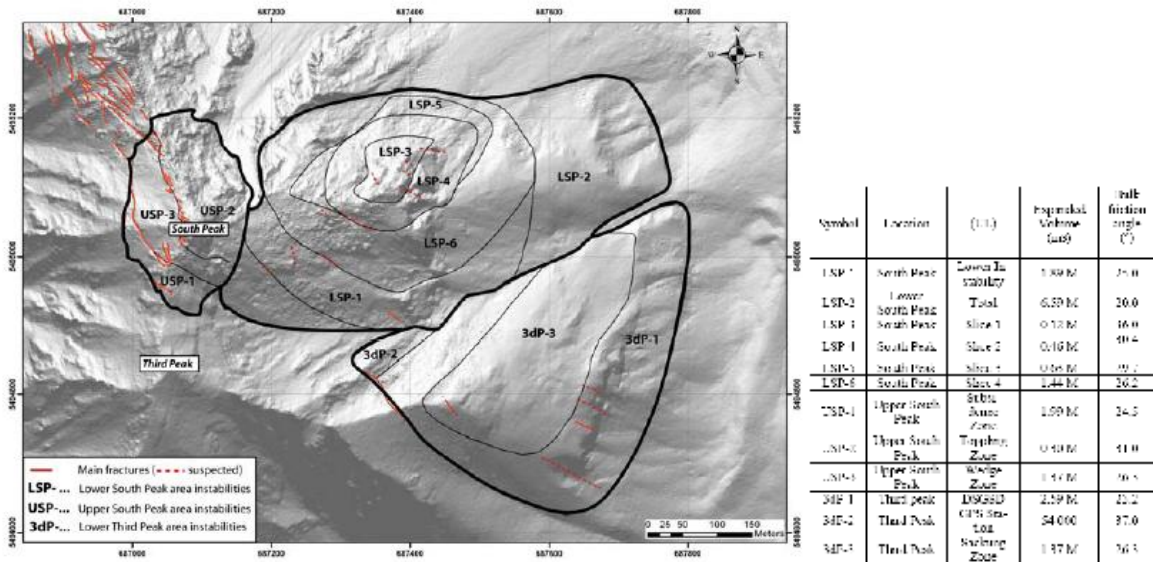


圖 18 龜山南峰及第 3 峰附近共 12 處種可能的岩體滑動破壞範圍圖，估計體積及滑動體摩擦力如右表(Pedrazzini et al., 2008)。

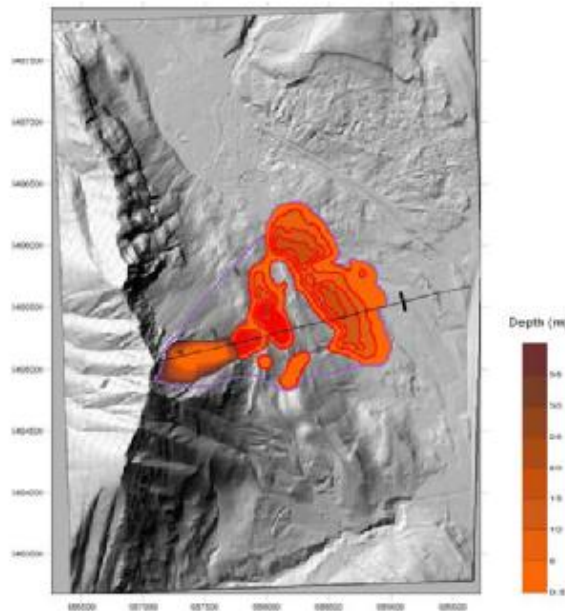


圖 19 滑動體積最高的 LSP-2 範圍若發生岩體滑動，數值模擬影響區的範圍 (Pedrazzini et al., 2008)。

因此亞伯達省地質調查所也利用 Oldrich Hungr 教授 DAN 3D 岩崩境況模擬程式的模擬結果，圈繪出龜山地區未來可能發生岩體滑動的最大影響範圍(如圖 20 中的綠色範圍)。亞伯達省地質調查所已將這些地質調查成果及龜山地區未來可能發生岩體滑動的最大影響範圍等相關資料公布在網路上，不僅頻繁的更新最新調查資料，也在各項公開場合或地區會議中向當地居民及政府官員宣導山崩災害的可能性及危險性。

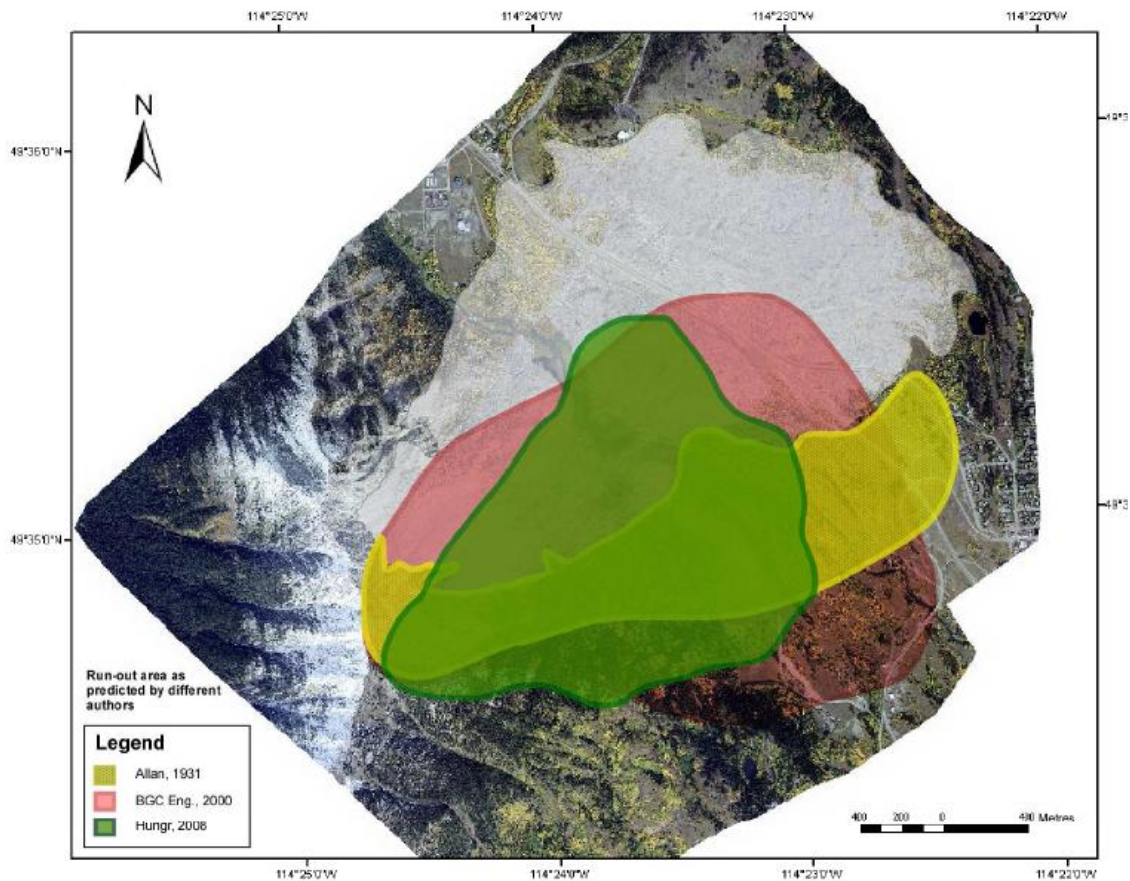


圖 20 龜山地區未來可能發生岩體滑動的最大影響範圍評估結果比較圖，黃色線及紅色線為前期利用簡易評估公式的範圍，綠色線為 DAN 3D 岩崩境況模擬程式的模擬結果(Canadian Geotechnical Society, 2010)。

2.3 研習亞伯達省法蘭克岩體滑動區的監測及預警系統

由於法蘭克岩體滑動區附近的龜山南峰及第 3 峰，經評估分析後，具有岩體滑動潛勢，因此亞伯達省當局自 2003 年起推動監測計畫，並在 2005 年委由亞伯達省地質調查所規劃及執行完整的監測及預警系統(Moreno and Froese, 2009)。迄今亞伯達省地質調查所已於龜山南峰及第 3 峰附近，設置近 80 處地工監測設備，並完成一套幾乎即時的監測系統(a near-real-time monitoring system)。亞伯達省地質調查所每年度必須分析研判各項監測數據，評估山崩不穩定區、影響區及岩體滑動長期趨勢，並引進新期監測技術，強化岩體滑動監測及預警效能。

這套監測系統的監測成果，必須要靠結合地質師及大地工程師的專業，進行正確的評估分析工作，進而掌握山崩風險。然而實際上還有許多重要因素構成整套監測系統的環節，包括監測設備種類、資料傳輸、監測數據專業判讀、監測預

警值設定、預警決策分析與訊息傳遞、預警應變計畫及居民防災意識等。

理想的預警系統主要作業流程包括蒐集資料(Collect Data)、資料傳輸(Transfer Data)、資料分析評估(Review Data)及山崩風險傳遞發布(Communicate Risk)，每 1 處作業流程均具有設備故障、失誤或窒礙難行的風險，造成預警工作無法順利執行，因此亞伯達省地質調所另外制訂監測預警標準作業程序(ERCB/AGS Roles and Responsibilities Manual for the Turtle Mountain Monitoring Project, Alberta)及監測系統作業程序(ERCB/AGS System Manual for the Turtle Mountain Monitoring Project, Alberta)，以做為監測及預警工作的執行依據。

在龜山南峰及第 3 峰附近的監測設備包括(圖 21)：

- 1.基本監測裝置(Primary Sensors)，提供高解析度、小位移量的即時監測：
 - (1) 22 處裂縫計(crackmeter)；
 - (2) 10 處岩盤傾斜計(tiltmeter)；
 - (3) 5 處地表伸張計(surface wire extensometer)。
- 2.次要監測裝置(Secondary Sensors)，提供較低解析度、大位移量的長期監測：
 - (1) 1 處全測站(total station)監測儀及 20 個反光稜鏡(reflective prisms)；
 - (2) 11 處 dGPS 接收儀。
- 3.輔助監測裝置(Tertiary Sensors)，提供環境基本資訊，俾利監測分析：
 - (1) 1 處氣候測站，包括雨量計、風速計、溫度計及氣壓計；
 - (2) 1 處地下水位計；
 - (3) 2 處網路攝影機(web camera)；
 - (4) 6 處微震測站(seismic stations)；

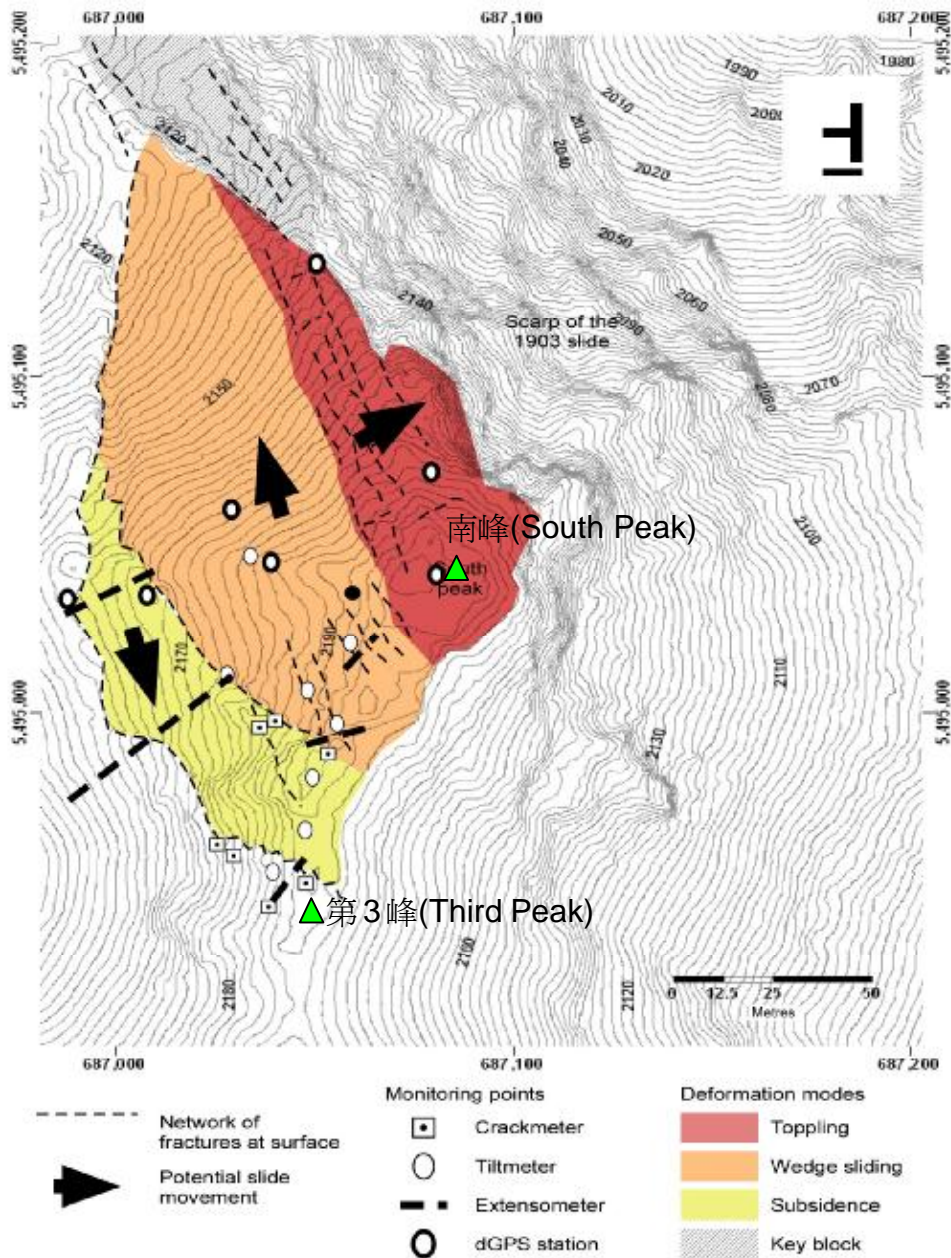


圖 21 龜山南峰及第 3 峰附近的不穩定岩體及監測設備位置圖(Moreno and Froese, 2009)。

亞伯達省地質調查所在龜山南峰及第 3 峰附近的監測成果如圖 22-26，監測資料整理至 2008 年底為止(Moreno and Froese, 2009)。各式基本監測裝置原則上每 15 秒讀取資料一次，每隔 1 小時傳輸監測資料至終端伺服器，並經短暫運算後即可在個人電腦的監測展示系統中呈現資料結果。從監測資料結果顯示，少部分監測設備(如裂縫計 CkMt4、CkMt7；地表伸張計 Ext1、Ext5)呈現長期緩慢變形的趨勢；但大部分的監測結果顯示龜山南峰及第 3 峰附近的岩體並未有顯著的變形現象。這些少部分呈現長期緩慢變形趨勢的監測設備，再交互比對相鄰位置

附近的監測成果，發現可能並非反映真實的大規模岩體變形現象，因為相鄰的監測設備(如 dGPS)並未顯示類似的位移變化；全測站反光稜鏡 PR15 更被認為是裝置在一處不穩定岩石上，導致大幅度的位移。

此外各式監測儀器的即時監測成果也不甚理想。置於山頂的監測或傳輸設備，不僅受到每年或每日大幅度溫差的影響，或是受到落雷的襲擊，往往導致儀器損壞並中斷監測；價格昂貴的微震測站均已受雷擊而損壞。野外的降雨、降雪及潮濕的空氣，往往造成電子儀器感應不良，造成雜訊(如圖 22 中裂縫計 CkMt6 在 2007 年至 2008 年間的異常訊號、圖 26 中岩盤傾斜計 Tilt3 在 2005 年至 2006 年間的異常訊號)。dGPS 在水平方向上的監測成果，每日資料的解算成果誤差範圍仍超過 1 公分；全測站的反光稜鏡誤差範圍也接近 2 公分(該全測站監測儀與反光稜鏡的距離約 2 公里)，並常受到大霧、降雨、降雪等天候因素導致無法量測。

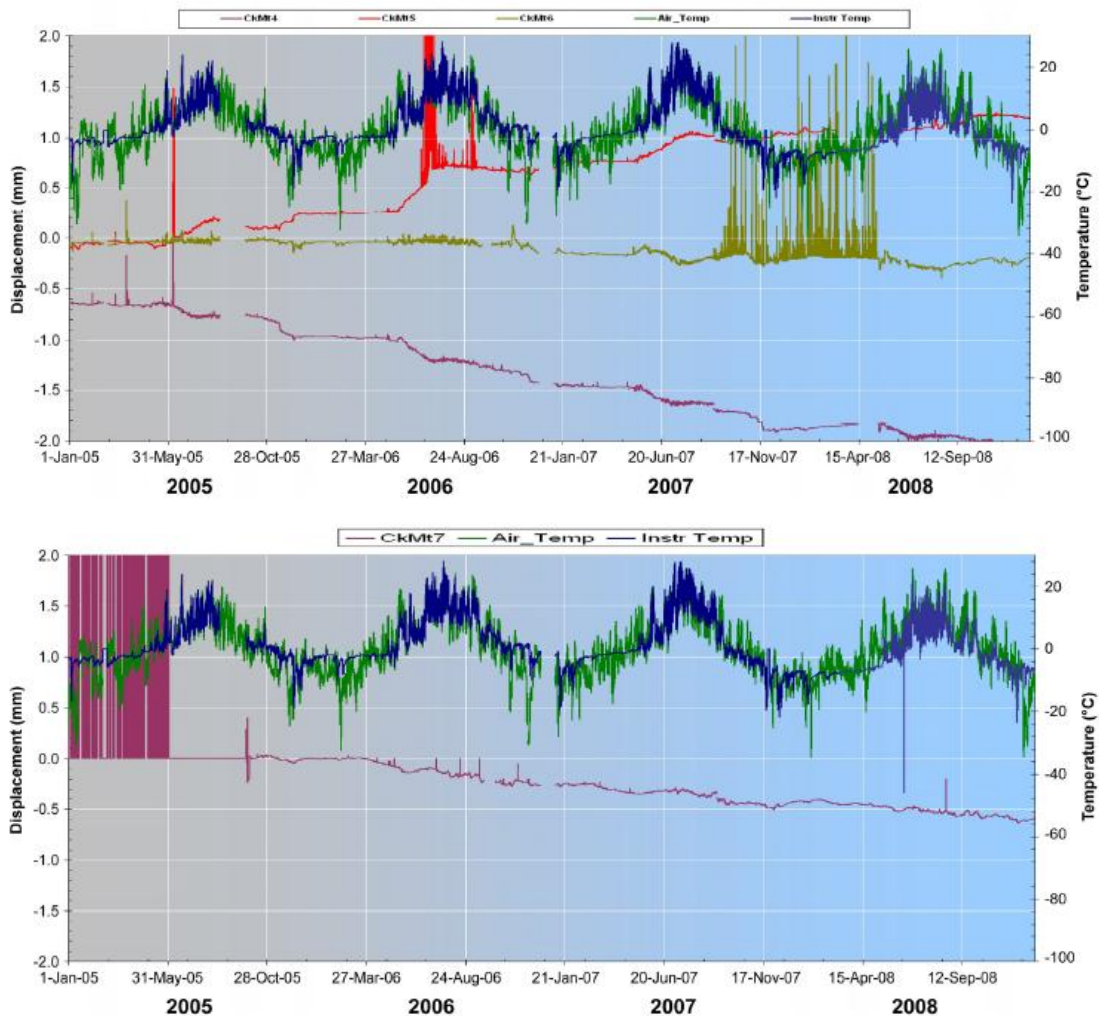


圖 22 龜山南峰及第 3 峰附近的裂縫計監測成果圖，並與地表溫度(Air_Temp)及岩盤溫度(Instr_Temp，置於孔內 0.2m 處)做比較。

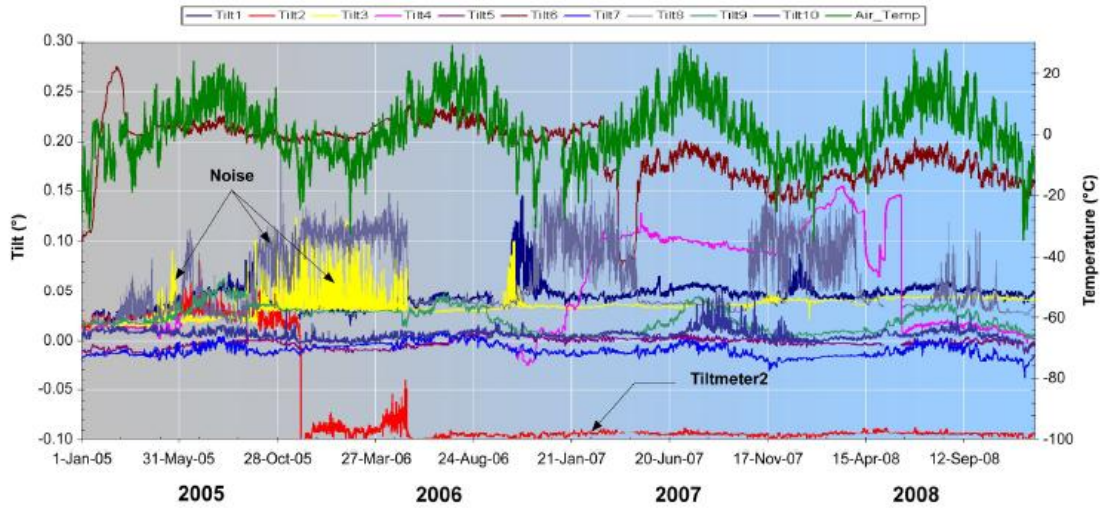


圖 23 龜山南峰及第3峰附近的岩盤傾斜計監測成果圖，並與地表溫度(Air_Temp)做比較。

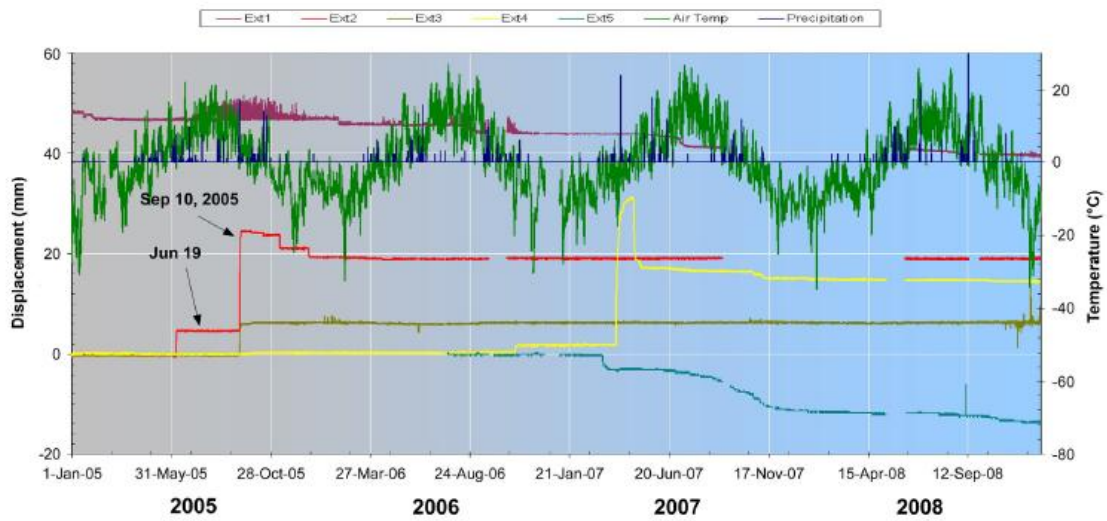


圖 24 龜山南峰及第3峰附近的地表伸張計監測成果圖，並與地表溫度(Air_Temp)及降雨量(Precipitation)做比較。

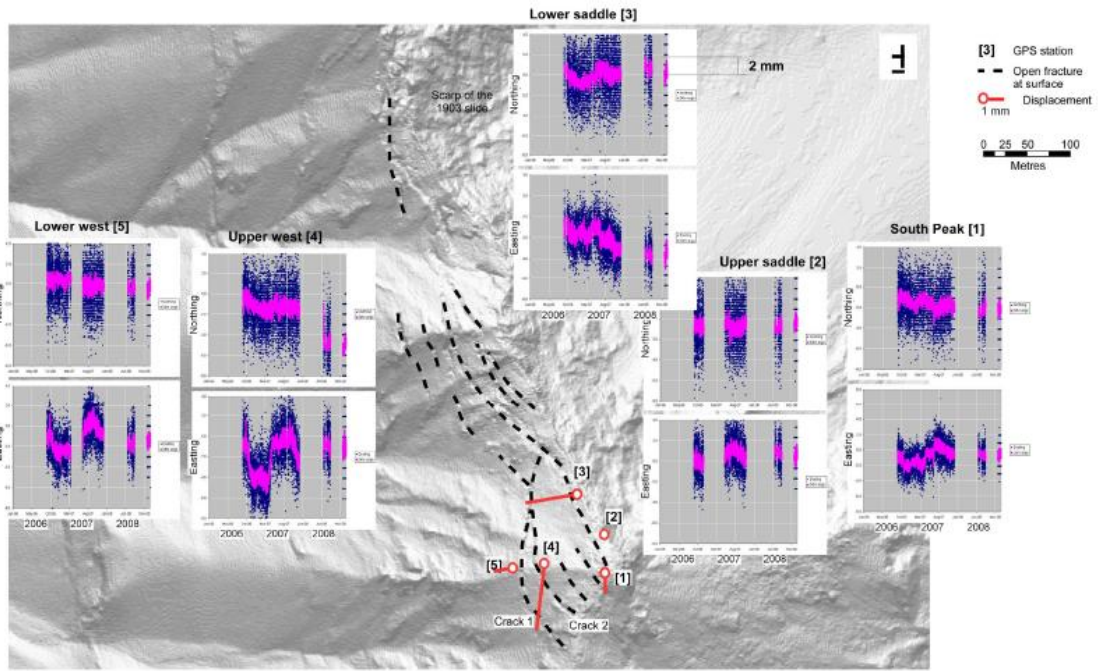


圖 25 龜山南峰及第 3 峰附近的 dGPS 監測成果圖，至 2008 年為止僅有 5 處測站，各測站位移監測成果並區分為南北向(Northing)及東西向(Easting)。

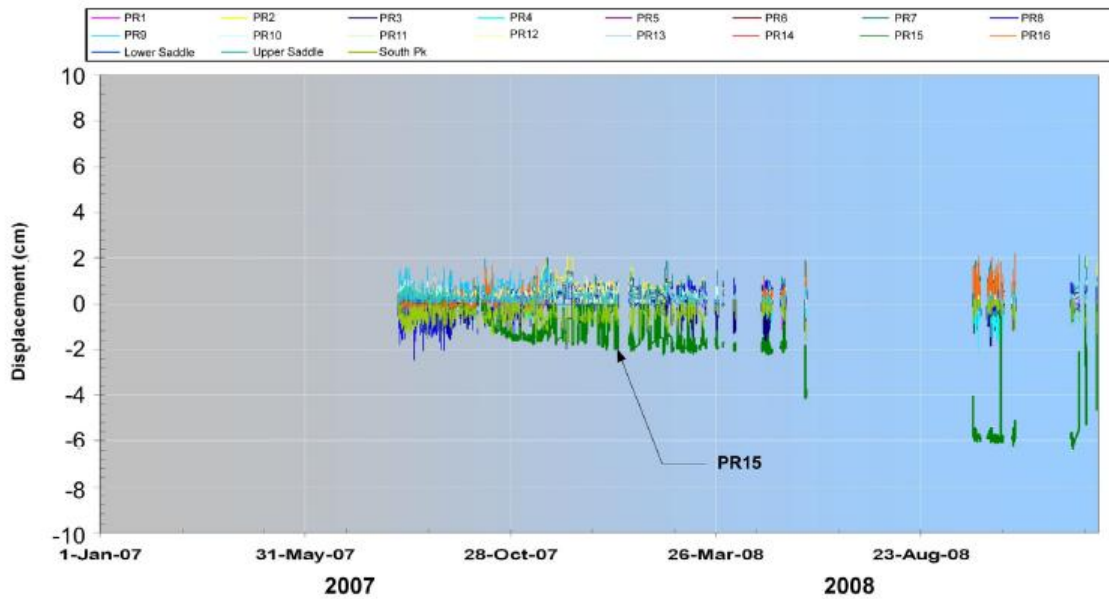


圖 26 龜山南峰及第 3 峰附近的全測站反光稜鏡監測成果圖。

此外，亞伯達省地質調查所也運用干涉合成孔徑雷達(Interferometric Synthetic Aperture Radar, 簡稱 InSAR)技術，利用多期衛星影像來量測龜山地區的地表垂直變位。但由於龜山山頂上由崎嶇不平且破碎的岩盤所構成，InSAR 的量測結果並不理想；但研究人員意外發現，在法蘭克岩體滑動區的崖錐及影響區

範圍有不錯的成果(Mei et al., 2008)。在法蘭克岩體滑動區的崖錐及影響區範圍最東側，地底下分別為 Frank 煤礦及 Bellevue 煤礦的廢棄坑道，利用 2004 與 2006 年衛星影像進行 InSAR 分析量測，發現這些地方均有地表下陷的現象，每年下陷量最高達 4mm(圖 27)。近期亞伯達省地質調查所並與加拿大亞伯達大學合作，利用地面干涉合成孔徑雷達(Ground-Based InSAR)方式進行坡面的地形掃描，每 5 分鐘掃描一次，期望利用這項新科技進行即時監測工作。目前該項技術仍在嘗試中。

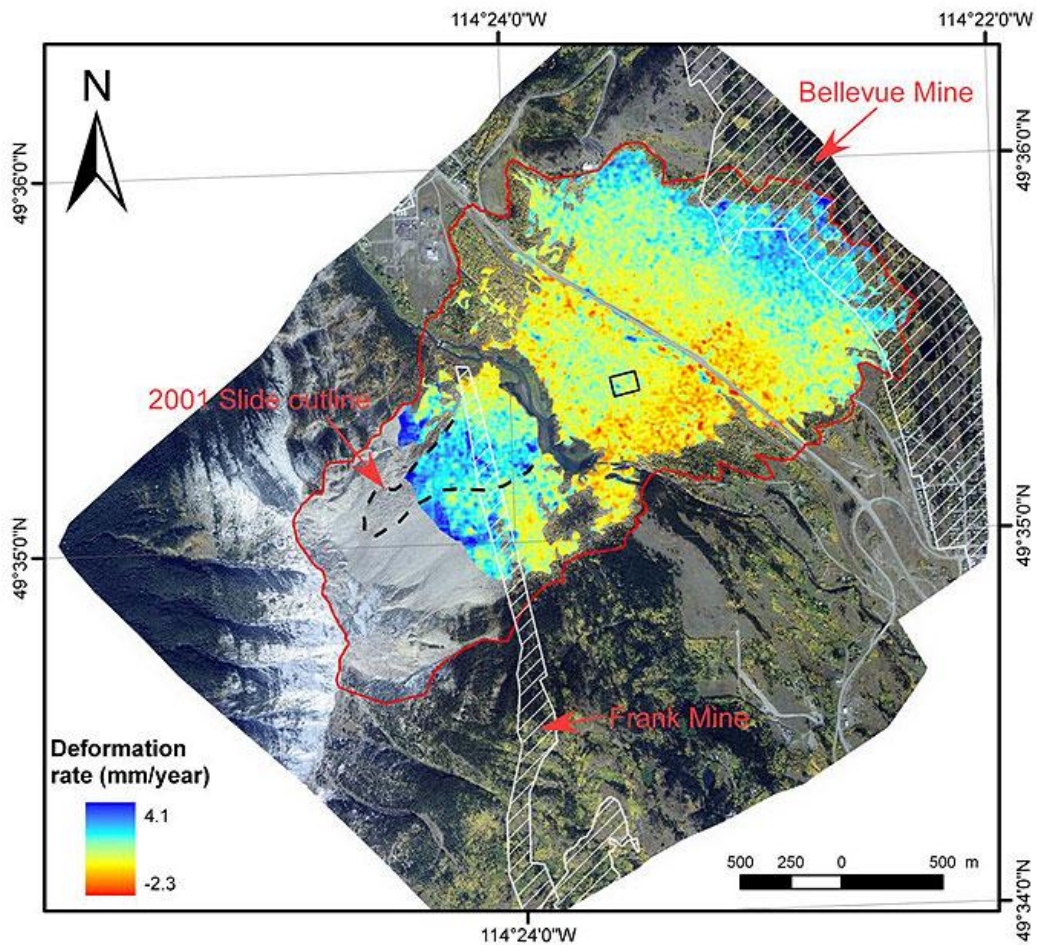


圖 27 法蘭克岩體滑動區利用 2004 與 2006 年衛星影像進行 InSAR 分析結果(Mei et al., 2008)。



圖 28 置於屋頂上的地面干涉合成孔徑雷達(Ground-Based InSAR)掃描設備，每 5 分鐘掃描一次後會自動返回原點，重覆掃描(攝於 2010 年 10 月 18 日)。

由近期的地質調查資料顯示，龜山的部分地區具有岩體滑動的潛勢，因此亞伯達省地質調查所結合相關研究機構的團隊，針對龜山地區完成一連串的地質調查、監測並開發預警系統，並朝向建立一套穩定且可靠的整合系統而努力。這項工作的目標，正式爲了保障居住在坡趾處人民的生命財產安全，因此監測儀器也不斷再翻新，努力嘗試應用最新的觀測科技(如 InSAR)。這並不是個一蹴可幾的工作，從亞伯達省地質調查所的經驗來看，即時監測這一環非常容易受到外在環境影響而失敗；此外長期且專業的投入研究人力與經費，都是在背後不可或缺的重要支柱。

2.4 研習山崩境況模擬軟體 DAN 3D

本項研習內容係前往卑詩大學地球環境系，拜訪 Oldrich Hungr 教授(Dr. Oldrich Hungr, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia.)。Dr.Hungr 專長在於大規模岩體滑動區的調查、岩崩(rock avalanche)及土石流的數值模擬，其研發的山崩境況模擬軟體 DAN 3D 已廣泛應用在快速山

崩及土石流影響區的模擬與應用，包括亞伯達省法蘭克岩體滑動區，並已獲致良好的成果，相關研究成果已發表於國際期刊中。

在岩崩及土石流發生後，滑動(或流動)材料的行爲將由靜態的穩定性分析轉變為動態的運動學分析，材料轉變為分離元素及真實物理行爲的複雜性，導致這項分析工作相當困難。目前國際上有關土石流的模擬，主要採用商用套裝軟體 FLO-2D 來進行。FLO-2D 程式係由美國學者 O' Brien 及 Julien 所開發，可進行二維土石流模擬，主要是利用體積守衡模式，以求解流體運動方程式、x 軸方向水深平均速度 u ，y 軸方向水深平均速度 v 及堆積深度 h 。FLO-2D 模擬需輸入之參數為：分析流域內之 DEM 提取，土石流溢流點位置、土石流出邊界點位置、流域內之降雨條件、水文模式之下之溢流點洪水歷線、由洪水歷線決定之土石流量歷線、流變參數、體積濃度參數、土石比重、層流阻滯係數等。由於 FLO-2D 的是以洪水歷線為輸入參數，藉由體積濃度設定轉換為土石流體積，因此對於土石流從發生區開始的流動現象無法完全解析；但藉由流變參數的設定，以黏滯性 (viscous) 流體的方式計算，對於泥流 (mud-flow) 或土石洪流 (debris-flood) 等含水量較多的流體具有較佳的模擬結果。

Dr.Hungr 教授研發的山崩境況模擬軟體 DAN 3D (McDougall and Hungr, 2004 ; McDougall and Hungr, 2005)，則是採用有限差分法求解水文連續體方程式，藉由質量及動量守衡的連續求解方式，計算岩崩或土石流等快速流動山崩方式的運動學過程，其預設的質流學 (rheology) 模式包括塑性流 (plastic flow)、牛頓層流 (Newtonian laminar flow)、紊流 (turbulent flow)、賓漢流 (Bingham flow)、庫倫塑性流 (Coulomb viscous flow) 及 Voellmy 流等 6 種，流動體中利用內摩擦角 (internal friction angle) 的設定做為內應力的計算依據，並可輸入基底阻抗 (basal shear resistance) 及基底最大侵蝕深度 (maximum erosion depth)。這套軟體必須輸入山崩前的原地形及崩場地範圍與深度，因此可以得到岩崩或土石流從發生區開始的流動現象。這套軟體在山崩開始發生的瞬間，仍然採用近似流體 (equivalent fluid) 的處理方式來模擬 (圖 29)，以解決真實繁複的地質狀況 (Hungr and

McDougall, 2009)，因此對於變形量相對較小的深層岩體滑動較不適用，而適用於大規模、快速流動、移動距離長的岩崩或土石流。亞伯達省法蘭克山崩也曾利用 DAN 3D 進行境況數值模擬(Hungr and McDougall, 2004)，採用基底阻抗 $\phi_b = 14^\circ$ 、內摩擦角 $\phi_i = 40^\circ$ 計算後，模擬結果與實際山崩影響區範圍大致吻合(圖 30)。從相關案例的回饋分析來看(Hungr Geotechnical Research, 2008)，山崩體積越大者，具有較低的基底阻抗角度(圖 31)，也表示會有更遠的傳輸距離(travel distance)。

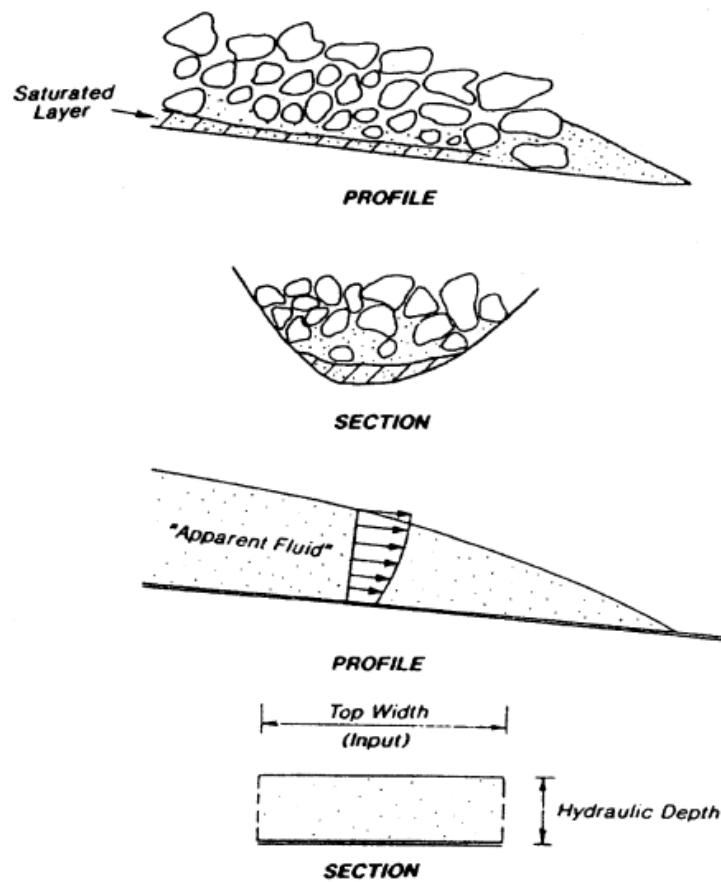


圖 29 圖示 DAN 3D 以近似流體(equivalent fluid)的處理方式來模擬真實繁複的岩崩或土石流地質狀況。

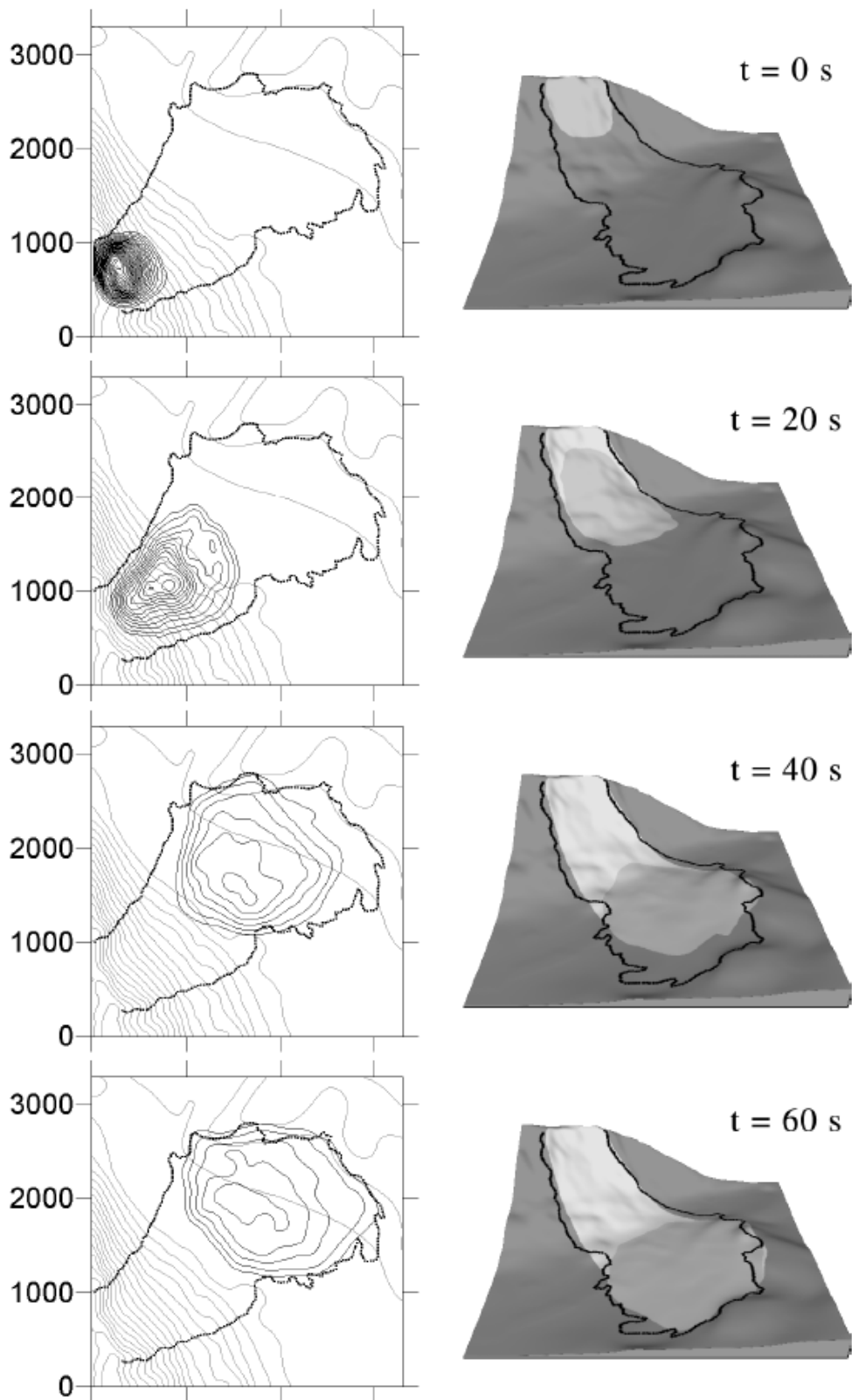


圖 30 利用 DAN 3D 進行亞伯達省法蘭克山崩的境況數值模擬，模擬結果與實際山崩影響區範圍大致吻合。

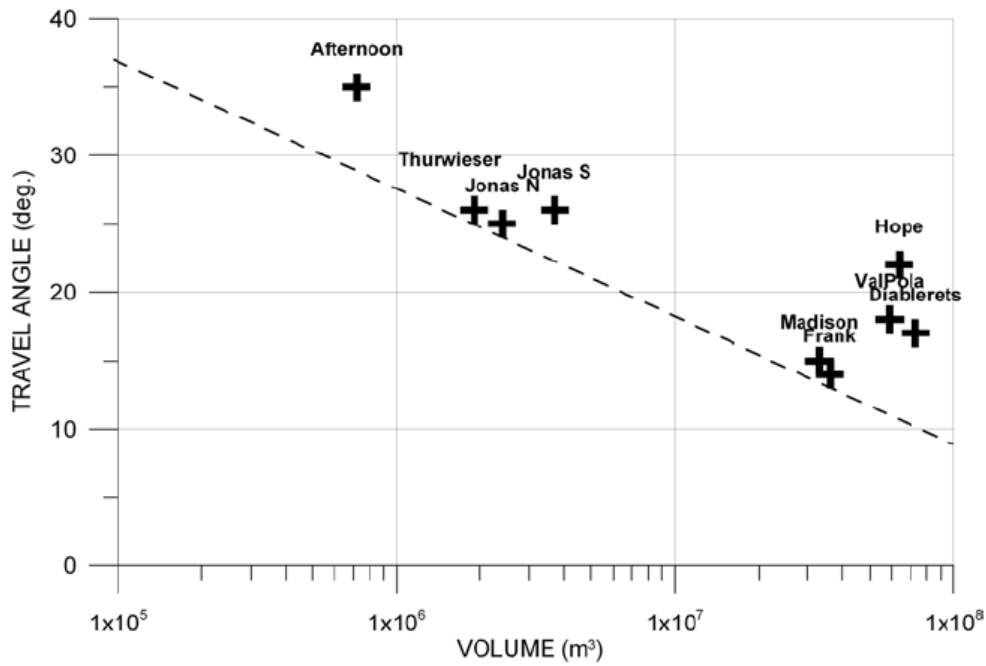


圖 31 相關案例的回饋分析顯示，山崩體積越大者，具有較低的基底阻抗角度，也表示會有更遠的傳輸距離(Hungr Geotechnical Research, 2008)。

在質流學的計算中，很重要的是滑動體的能量轉換方程式，也就是滑動體由山頂崩落滑下的過程中，位能及動能間的轉換方式。一般若採用 frictional 模式，位能及動能間的轉換方式是呈線性(如圖 32)；但經由相關案例回顧(Hungr et al., 2005)，Voellmy 的能量轉換方式會較為合理，可避免岩崩或土石流的移動距離或速率被高估，最大土石堆積深度的位置也會較接近山崩處。(McDougall and Hungr, 2004)

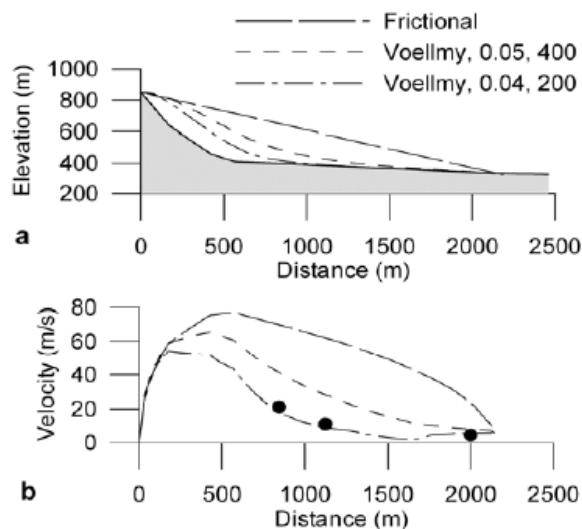


圖 32 圖示 DAN 3D 以近似流體(equivalent fluid)的處理方式來模擬真實繁複的岩崩或土石流地質狀況。

在這次研習中，也以臺灣高雄縣小林村山崩為對象，利用 Dr.Hungr 教授研發的山崩境況模擬軟體 DAN 3D 試做岩崩的影響範圍評估。利用災前數值地形及災後 LiDAR 地形資料(圖 33)，估算臺灣高雄縣小林村山崩在民國 98 年莫拉克颱風期間發生岩體滑動災害的體積，土方總流失面積約 888,100 平方公尺，流失土方約 25,673,847 立方公尺，土方總堆積面積約 1,888,575 平方公尺，增加土方約 25,212,521 立方公尺(葉堃生等，2010)。依據中央地質調查所 2000 年出版之甲仙圖幅，小林村附近分布的地層有楠峰大橋以北之糖恩山砂岩、以南之鹽水坑頁岩(圖 34)，其地層約相當於臺灣中西部一般人較為熟悉的桂竹林層之中、下段，地質時代則屬於中新世晚期至上新世早期。而小林村附近的地質構造包含有甲仙斷層、五里埔斷層、小林向斜及未命名之褶皺構造(經濟部中央地質調查所，2009)。

小林村位在旗山溪左岸所形成的低位河階上，莫拉克風災前聚落所在位置與旗山溪河床的高度僅相差約 3 至 5 米；其東側較高位置還有一高位河階(高度與小林南方的五里埔相當)。莫拉克風災後高位河階雖為崩塌土石所埋，但其約略位置仍可見，而小林聚落所在之低位河階地已不復見。莫拉克颱風的雨量，在小林村附近之甲仙氣象站，測得自 8/5 至 8/10 累積降雨總計達到 2075 毫米、最大時雨量更是驚人的 91.5 毫米/小時。因此，異常大量降雨應是造成災害的關鍵因素(經濟部中央地質調查所，2009)；此外，地質構造複雜、水文地質不利情形及順向坡地形等因素，也是也是造成山崩災害的潛在因素(李錫堤等，2009)。

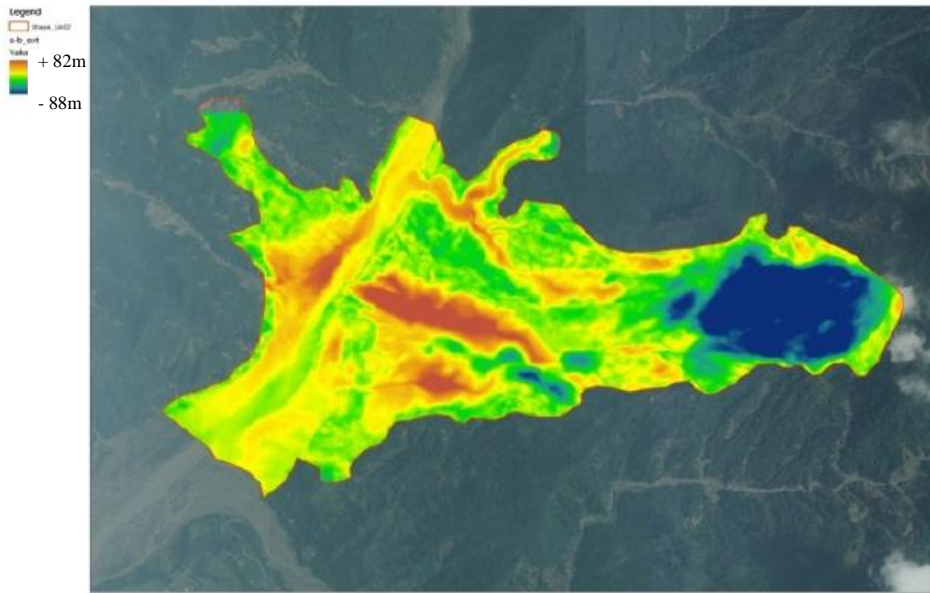


圖 33 利用災前數值地形及災後 LIDAR 地形資料，計算臺灣高雄縣小林村山崩的體積及地表高程變化圖(葉堃生等，2010)。

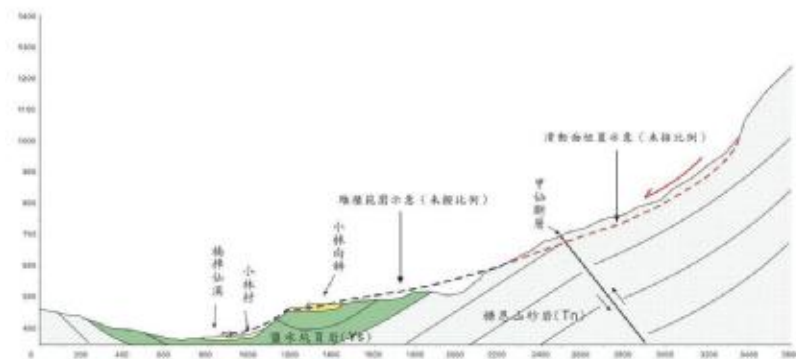
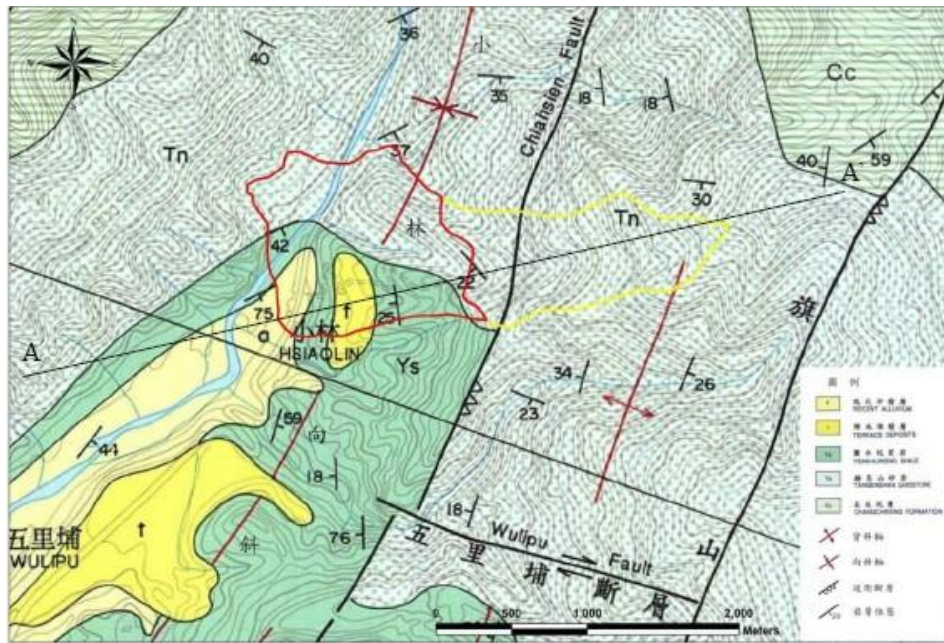


圖 34 小林附近之區域地質圖(上圖)及地質剖面圖(下圖)，主要地層為糖恩山砂岩與鹽水坑頁岩，並有多處斷層及褶皺等地質構造；小林村位於順向坡下方。(黃色線條圈繪出 88 水災山崩之崩塌區範圍；紅色線條圈繪出堆積區範圍)。

小林村山崩的源頭區主要位於邊坡的上半部，寬度約 800 公尺、長度約 1000 公尺，平均山崩深度約 40 公尺，最高估計接近 90 公尺。因此本研究利用這些資料，嘗試在山崩源頭區建置一粗略的滑動體地形模型(圖 35)，估算的滑動體體積約 2,100 萬立方公尺，大致接近於災前災後數值地形的估算結果(2,567 萬立方公尺)。分析模式分別採用 friction model 及 Voellmy model，輸入參數如表 2。利用 friction model 的模擬歷程結果如圖 36。

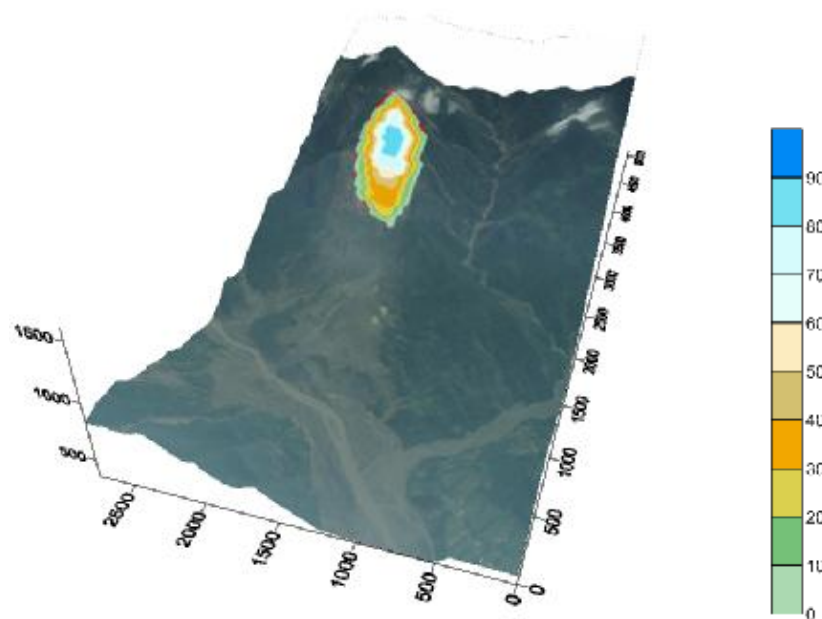


圖 35 本次研習在山崩源頭區建置的滑動體地形模型圖，寬度約 800 公尺、長度約 1000 公尺，最大深度約 90 公尺。

表 2 本次研習利用 DAN 3D 分析臺灣高雄縣小林村山崩境況模擬之輸入參數表

輸入參數	模式	Friction model	Voellmy model
Unit Weight (kN/m ³)		20	20
Shear Strength (kPa)		0	0
Friction Angle (deg.)		15	2.86241
Friction Coefficient		0	0.05
Pore-pressure Coefficient		0	0
Viscosity (kPa.s)		0	0
Turbulence Coefficient (m/s ²)		0	400
Power Law Exponent		0	0
Internal Friction Angle (deg.)		35	35

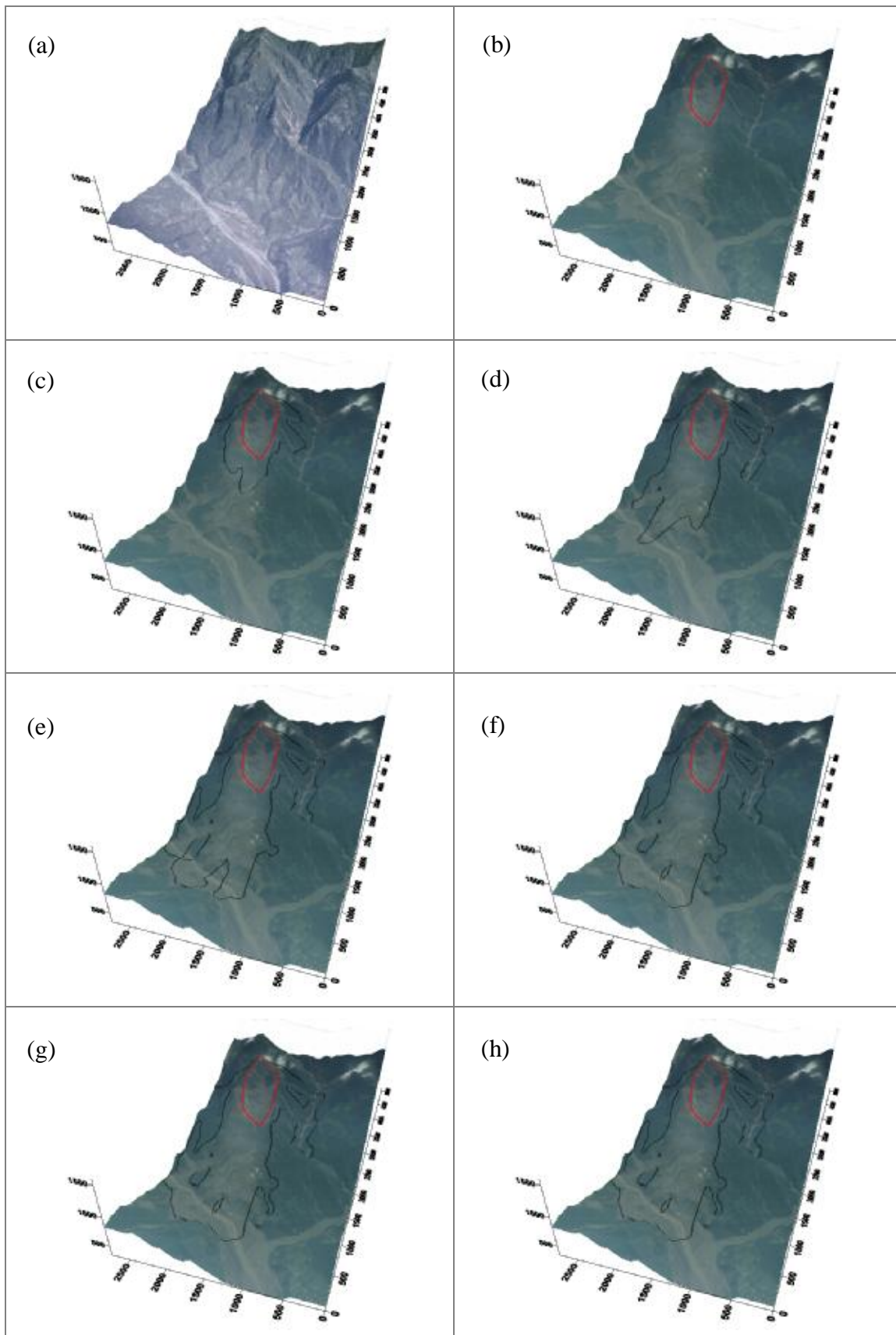


圖 36 利用 DAN 3D 的 friction model，針對臺灣高雄縣小林村山崩境況模擬的歷程，(c)~(f)中黑色線表示該模擬時間 滑動體的影響範圍。(a)山崩前正射影像；(b)山崩後正射影像，紅色線為模擬的滑動體範圍；(c)20 秒；(d)40 秒；(e)60 秒；(f)80 秒；(g)100 秒；(h)120 秒。

從模擬結果來看，小林村山崩約在 100 秒內即已完成山崩的歷程，滑動體不僅向下流動、跨越小林村後方的山脊而掩蓋小林村，也可發現該滑動體有向南及向北沿著溪溝溢流的情形；此外最後的山崩影響區範圍也大致與現狀狀況相符，並且滑動體也有向西跨越旗山溪、上滑至邊坡中段。若再比較 friction model 及 Voellmy model 的最後堆積區深度圖(圖 37)，可發現 2 者的山崩影響區範圍大致相近，但是堆積區的位置明顯不同；friction model 的堆積區主要集中在溪溝的中下游，Voellmy model 的堆積區則集中在旗山溪河道上，並有沿著旗山溪再向下游推移的現象。

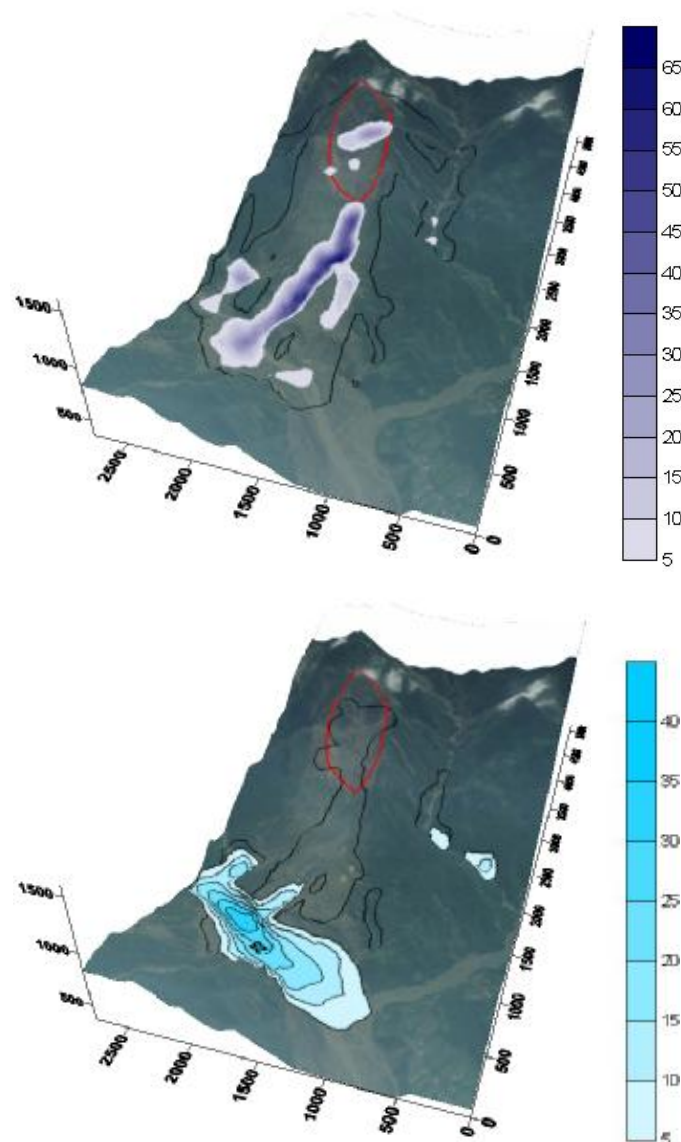


圖 37 利用 DAN 3D 的 friction model(上圖)及 Voellmy model(下圖)，針對臺灣高雄縣小林村山崩境況模擬的堆積區深度圖。

數值模擬的好處，在於可以重複輸入不同的參數設定，以試誤法的方式不斷反算分析，以求得最接近真實事件的參數。但缺點也在於參數的取得不易，且大自然的真實物理狀況難以藉由少數的參數反映，如地質構造、水文、材料性質等，因此相關的山崩或土石流研究，均不斷利用真實案例進行反算分析，期能獲得合理的參數範圍，並比較不同運算模式(如 DAN 3D、FLO-2D)的優缺點及適用性。近期的研究顯示(Bertolo and Bottino, 2008)，採用 DAN 3D 的 Voellmy model，對於土石流的模擬有不錯的成果，尤其是堆積區深度與分布範圍，但土石流流速則與真實狀況略顯不符；採用 FLO-2D 對於土石流的流速分析似乎與真實狀況較相符，但仍以含水量較高的土石流或土石洪流較適用，並且因 FLO-2D 中輸入的為流量歷線，地形的精度會影響水文流量分析，進而大幅影響模擬結果。

2.5 研習及野外考察卑詩省海天廊道的土工災害

本項研習內容為研習北溫哥華海天廊道(sea-to-sky corridor)的山崩、土石流問題及整治對策，並前往野外考察海天廊道上 Harvey Creek 及 Alberta Creek 的土石流治理工程。

海天廊道位於溫哥華的北側，為編號 99 之快速道路，起點由溫哥華開始，經馬鞋灣(Horseshoe Bay)、惠斯勒(Whistler)至潘伯頓(Pemberton)，全長約 110 公里(圖 38)。該公路最大的特色在於從高程接近海平面的溫哥華，向北延伸經由豪灣(Howe Sound)的冰峽(fjord)地形，向北深入惠斯勒近 2000 公尺高的山區；但也因此在豪灣地區必須在陡峭的山坡下開鑿公路，自 1958 年該公路開通以來，該地區的山崩不斷。該地區地質上以火成岩為主，岩性包括石英岩、花崗岩及閃長岩。該地區年降雨量可高達 3000 公釐，是加拿大降雨量最多的地區之一，也造成該地區土石流或土石洪流的災害不斷(Blais-Stevens and Hungr, 2007)。

自過去 150 年以來，數以百計的山崩在害在此發生，該地區山崩致死的人數佔加拿大全國山崩致死的人數(多於 600 人)之 18%；亞伯達省法蘭克山崩致死的

人數約佔 15%。由於該廊道有鐵路、公路通過，在經濟運輸上具有重要的地位，因此加拿大政府及卑詩省政府對於該廊道地工災害的整治與預防，投入相當多的調查與整治工程。從相關文獻回顧 154 件曾發生的山崩事件(Blais-Stevens and Hungr, 2007)，海天廊道發生山崩的種類包括：落石、岩崩、岩體滑動、岩屑崩滑、土石流及海底山崩(圖 38)；其中落石災害及岩體滑動災害是最難預防、卻也最易致災的山崩類型。在 1964 年在 Brunswick Point 附近(圖 38)，由於公路切過陡峭的花崗岩邊坡坡趾，而花崗岩解壓節理的傾向又與邊坡同向，在坡腳被切斷的狀況下，造成花崗岩產生順著節理面的平面型岩體滑動(translational rockslide)；在 2008 年相同位置附近又再產生一次平面型岩體滑動，造成鐵公路交通中斷(圖 39)。雖然大部分的邊坡都已設置防落石網或岩釘，以防範落石災害；但對於岩體滑動則仍難以預防。

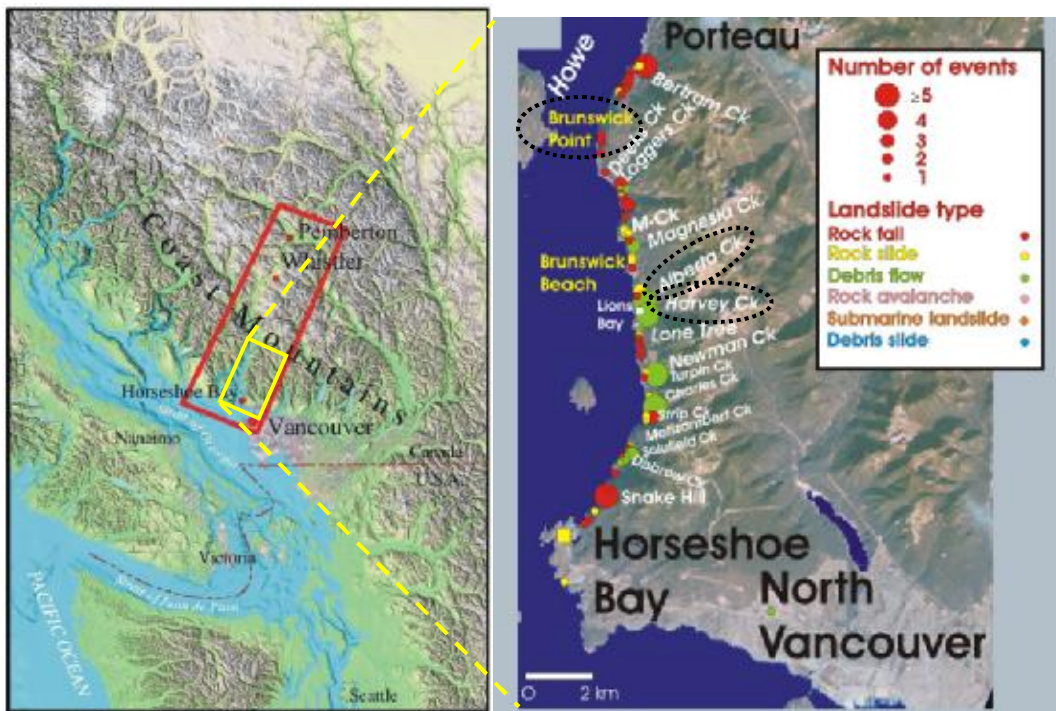


圖 38 卑詩省海天廊道的位置圖(左圖)及歷史山崩災害事件種類及分布圖(右圖，為左圖黃色框線範圍)。

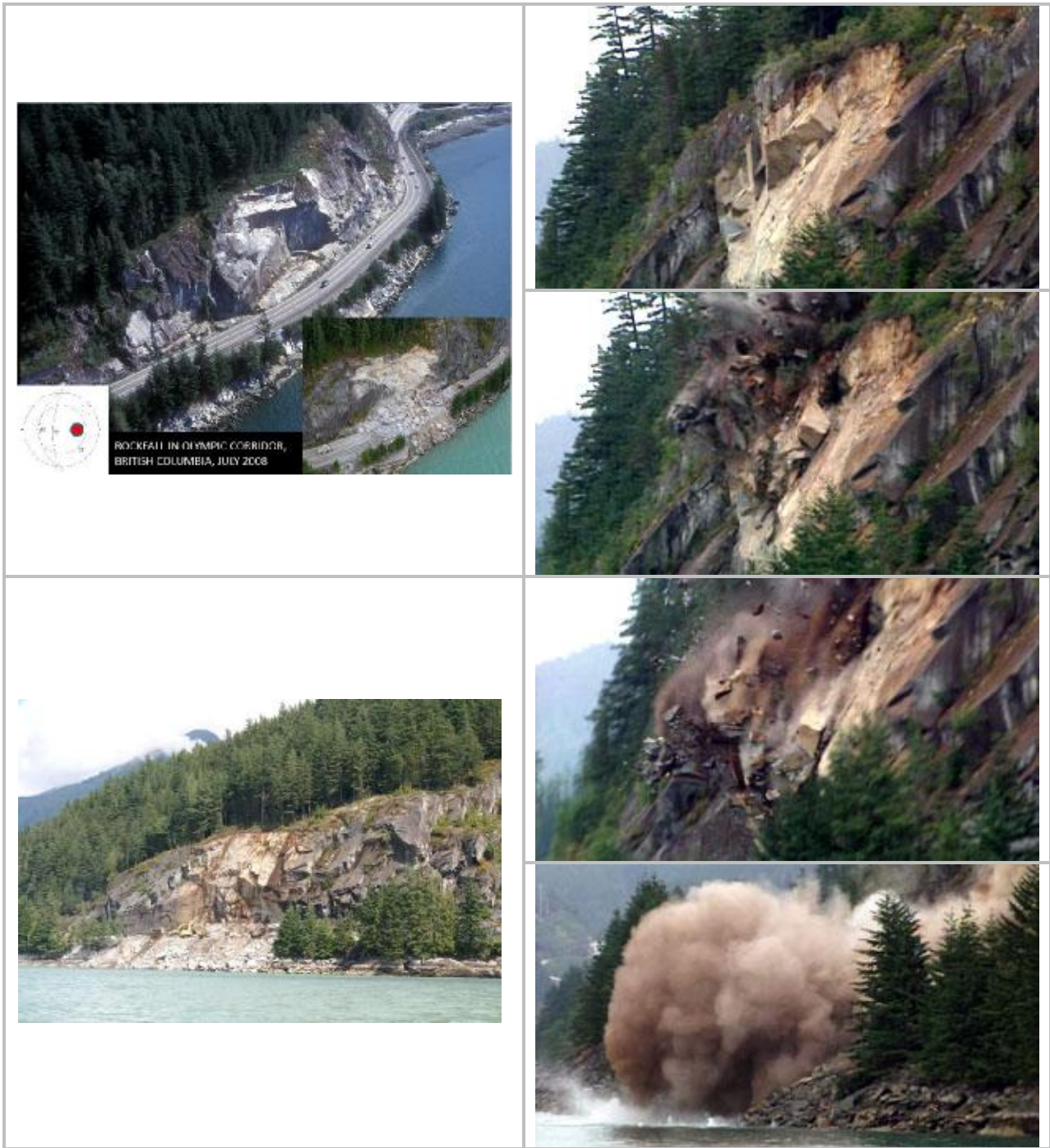


圖 39 卑詩省海天廊道在 Brunswick Point 附近，花崗岩順著解壓節理產生平面型岩體滑動。圖左上：2008 年岩體滑動概況，右下角小圖為 1964 年岩體滑動概況；圖左下：2008 年岩體滑動概況；圖右：2008 年部分岩塊產生岩體滑動時被 CBC 新聞所捕捉之畫面。以上照片引用自網路 (<http://daveslandslideblog.blogspot.com/2008/08/follow-up-to-sea-to-sky-highway.html>)。



圖 40 卑詩省海天廊道道路邊坡所設置的防落石網(左)及岩釘(右)，攝於 2010 年 11 月 2 日。

野外考察部分則前往海天廊道上 Harvey Creek 及 Alberta Creek 的土石流治理工程(圖 38)。Harvey Creek 的集水面積約 700 公頃，主流長度約 5.25 公里，發源自海拔 1646 公尺高的獅子峰(the summit of Lions)。主流陡峭，至下游的扇狀地坡度大幅變緩，坡度約 13-14 度。該溪溝在 1969、1972、1973 及 1981 年均發生過土石洪流，並在 1981 年發生土石流溢流，土石方約 7 萬立方公尺，造成 30 處民宅與公路、橋樑受損。卑詩省運輸處(BC Ministry of Transportation)於 1985 年在此溪溝中設立一座沈沙滯洪池，設計容量達 6.8 萬立方公尺(表 3，圖 41)，並在池底設置溢洪道(spillway)，做為平常溪流正常排水(Couture and VanDine, 2004)。

Alberta Creek 是一條很陡峭、集水面積較小的溪溝，集水面積約 120 公頃，主流長度約 2.6 公里，坡度約 16-24 度。在 1982 年及 1983 年均發生土石流及土石洪流，其中 1983 年的土石流肇因於中游 1 處小規模的山崩。由於土石流量不大，因此土石流的整治並未設置沈沙滯洪池，而是疏浚並降低河床高度(包括入海處的海底河道)，並將溪溝以光面混凝土處理，以加速排水及排沙速度(表 4，圖 42)。

表 3 Harvey Creek 及相關整治設施概要表

Events	1969 (debris flood?, flood?), 1972, 1973, 1981 (floods)
Future debris flow probability	Moderately high
Element at risk	Multiple residences, subdivision roads, highway and railway
Drainage area	7 km ²
Creek length	5.25 km
Design debris flow	62,500 m ³
Design debris discharge	500 m ³ /sec
200-year flood	107 m ³ /sec
Debris control measure	Debris basin, barrier and downstream channelization completed in 1985
Design storage volume	77,500 m ³
Spillway design capacity	1000 m ³ /sec
Structural impact	2 m diameter boulder traveling at 7m/sec
Volume of fill	68,000 m ³
Volume of concrete	1,850 m ³
Reinforcing steel	215,000 kg
Cost	\$4.4 million (1985)
Owner	BC Ministry of Transportation
Designers	Thurber Engineering Limited and Ker Priestman & Associates



圖 41 Harvey Creek 的沈沙滯洪池概況，圖左上及圖左下攝於 1995 年(Couture and VanDine, 2004)，圖右上及圖右下攝於 2010 年 11 月 2 日。

表 4 Alberta Creek 及相關整治設施概要表

Events	1982, 1983 (debris flows)
Future debris flow probability	High
Element at risk	Multiple residences, subdivision roads, highway and railway
Drainage area	1.2 km ²
Creek length	2.6 km
Design debris flow	15,500 m ³
Design debris discharge	350 m ³ /sec
200-year flood	22.7 m ³ /sec
Debris control measure	Flume with sea basin storage completed in 1988
Length of flume	800 m
Volume of excavation	42,000 m ³ (land); 33,000 m ³ (marine)
Volume of fibre reinforced concrete lining	3,500 m ³
Area of pre-cast channel walls	1,100 m ²
Cost	\$8.6 million (1988)
Owner	BC Ministry of Transportation
Designers	Thurber Engineering Limited and Ker Priestman & Associates



圖 42 Alberta Creek 概況，圖左上及圖左下攝於 1995 年(Couture and VanDine, 2004)，圖右上及圖右下攝於 2010 年 11 月 2 日。

2.6 研習及野外考察亞伯達省愛特蒙頓地區的地工災害

本項研習內容為拜訪愛特蒙頓市政府運輸局 (Engineering services, Transportation, the city of Edmonton) 局長 Don Lewycky 及資深工程師 Paul Lach，研討愛特蒙頓市區道路邊坡的山崩災害及廢棄煤炭坑道引致的地盤下陷問題，此外並前往現場進行考察。

近期愛特蒙頓最大的山崩災害是發生在 1999 年的 Whitemud 山崩(圖 43)，地點在 North Saskatchewan 河畔，恰位於河岸攻擊坡，其寬度約 270 公尺，滑動體體積約 25 萬立方公尺(SoeMoe et al., 2009)。該地區主要由近 40 公尺、水平層狀的未固結沈積物所構成，包括黏土、砂及冰磧土(till)等，其下方則為白堊紀的基盤岩層，屬於沈積岩，岩性為砂岩與頁岩互層、泥岩並偶夾薄煤層及膨潤土層(bentonite)。經過鑽探及地質調查，該山崩的機制與當時的大幅降雨及地下水滲流有關，然而在滑動的機制分析方面，基盤岩層中的膨潤土層可能扮演很重要的角色。由於基盤岩層頂部(沈積物底部)恰為相對不透水的介面，容易蓄積地下水，增加岩盤的含水飽和程度；但膨潤土層在吸水後，容易造成強度弱化，甚至有吸水膨脹的現象，因此成為山崩材料的滑動介面。膨潤土層(或黏土層)常與煤層共生，臺灣的含煤地層(如木山層、石底層、南莊層)中，煤層的底部或頂部即常見這類的黏土層；此外火山岩(尤其是凝灰岩)風化後也常轉變為黏土層，臺灣也有許多類似滑動機制的山崩案例，如桃園的介壽崩場地、台北市的南港崩場地等(王文能，1986)，滑動機制值得深究。

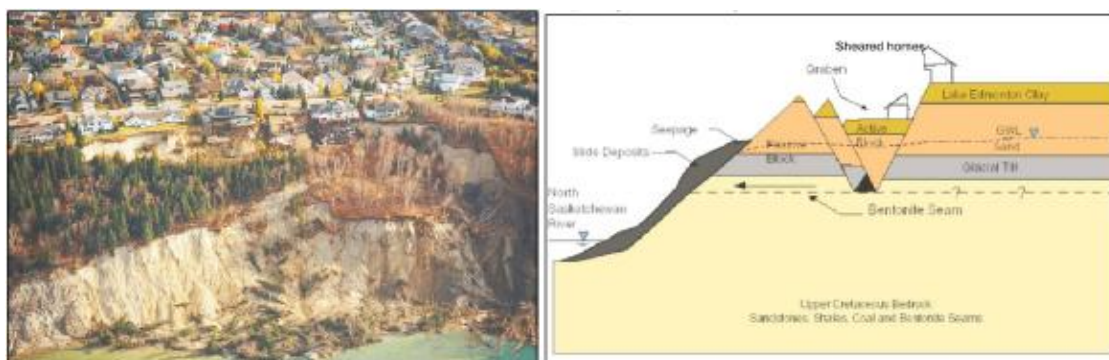


圖 43 愛特蒙頓 Whitemud 山崩(左圖，摘自網路照片)及其剖面圖(右圖)。

另一種愛特蒙頓的土工災害，是廢棄煤炭坑道引致的地盤下陷問題，其中一處最大的山崩案例是發生在 1901 年的 Grierson Hill 山崩。這處山崩也是位於一處攻擊坡，寬度約 500 公尺，長度約 200 公尺(圖 44)，主要由水平層狀的未固結沈積物所構成，包括黏土、砂及冰磧土(till)等，其下方則為白堊紀的基盤岩層，屬於沈積岩，岩性為砂岩與頁岩互層、泥岩並偶夾薄煤層及膨潤土層(bentonite)(Edmonton Geological Society, 1993)。該山崩可能肇因於 1901 年的豪雨，但之後持續緩慢的滑動了很長一段時間，至 1915 年止滑動距離超過 2.5 公尺。由於該山崩的下方基盤岩層中，曾有煤礦的開採，據信至少有 9000 噸的煤礦自地底下挖掘送出，因此該山崩的原因，可能是煤礦挖掘後的存留空間，引致地表下陷，並將岩體向側邊推擠；基盤地層中有多層膨潤土層並分布在不同深度，是個強度較弱的關鍵地層，可能有數個滑動面在這些膨潤土層中發育。目前該山崩經多年整治，包括擋土排樁、排水孔及地表回填，目前已呈穩定狀態(圖 45)。

由於廢棄煤炭坑道可能引致地盤下陷及山崩問題，近期愛特蒙頓市政府運輸局也利用 InSAR 技術進行全市的地表下陷調查，尤其針對廢棄礦區附近地區，初步成果雖然不理想，並未有具體的地表下陷現象，但也可能表示近期已較無廢棄煤炭坑道引致的地盤下陷狀況。類似的問題也出現在臺灣，也有多則廢棄坑道引致的地盤下陷問題，如臺北縣中和市東運盜土礦案例；經濟部裝央地質調查所亦已針對臺灣廢棄坑道引致的地盤下陷災害潛勢進行評估。在土地開發已朝向就有礦區發展之際，該種地質災害潛勢亦應審慎進行評估。

相關地質專家關注的另一項地質災害議題，是火山活動。亞伯達省地質調查所及愛特蒙頓地質學會等地質學家在 North Saskatchewan 河畔的露頭中，發現 1 薄層的火山灰。這 1 層火山灰厚度約為 1 公分(圖 46)，經由定年資料及相關地質調查，該層火山灰可能是 6800 年前，美國奧勒岡(Oregon)州 Mazama 火山劇烈噴發後的產物，並且傳輸了 1450 公里至愛特蒙頓，這也可以想見當時火山噴發的劇烈程度。

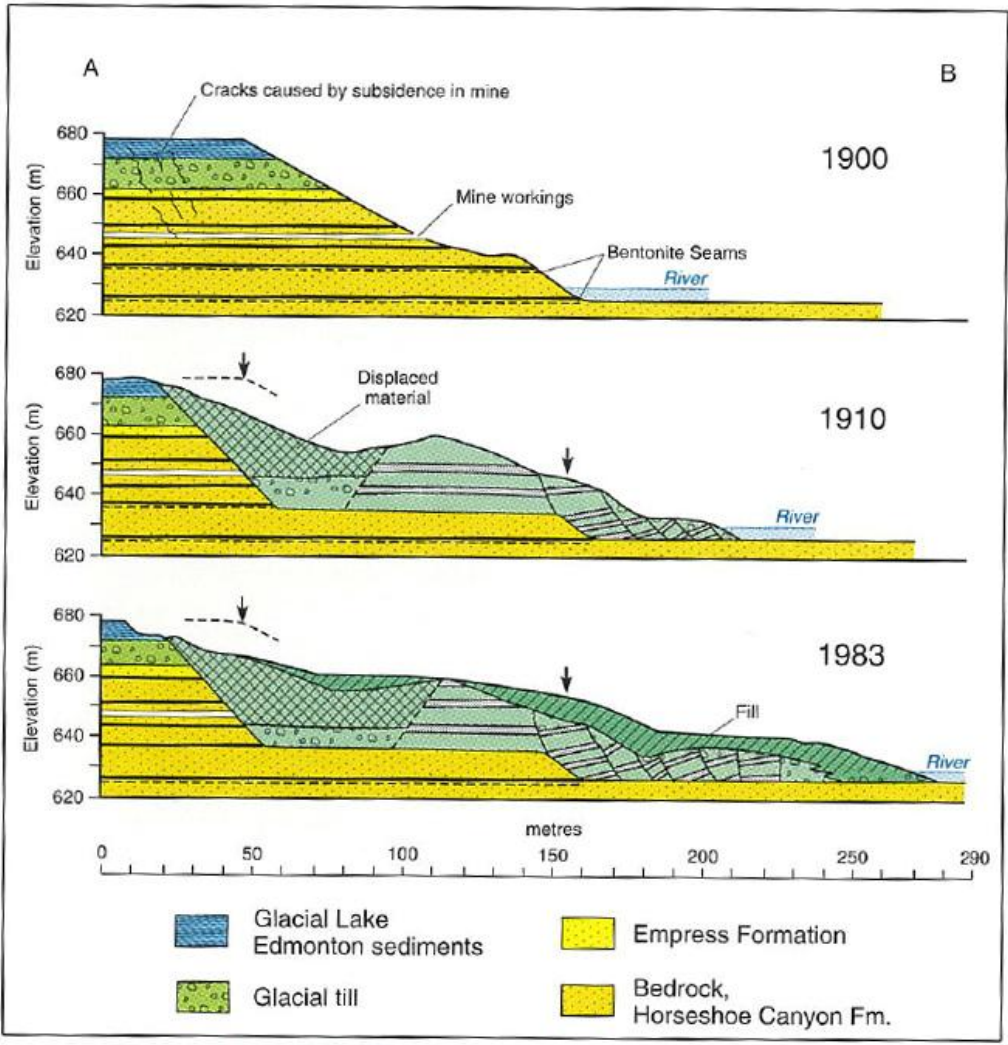
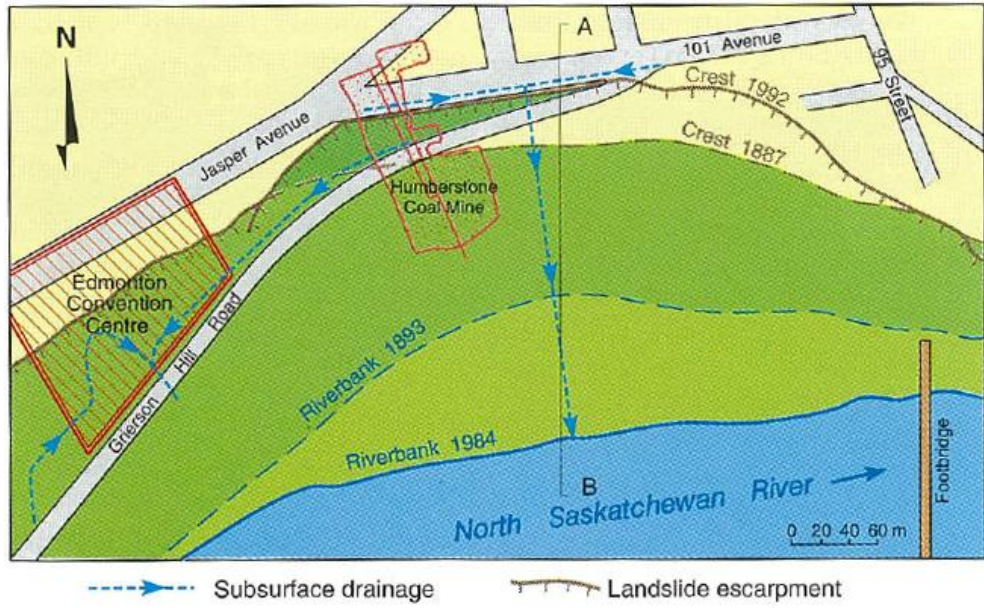


圖 44 愛特蒙頓 Grierson Hill 山崩平面圖(上圖)及剖面圖(下圖)(Edmonton Geological Society, 1993)。



圖 45 愛特蒙頓 Grierson Hill 山崩經整治後現況，原址並已新設國際會議中心(攝於 2010 年 10 月 27 日)。

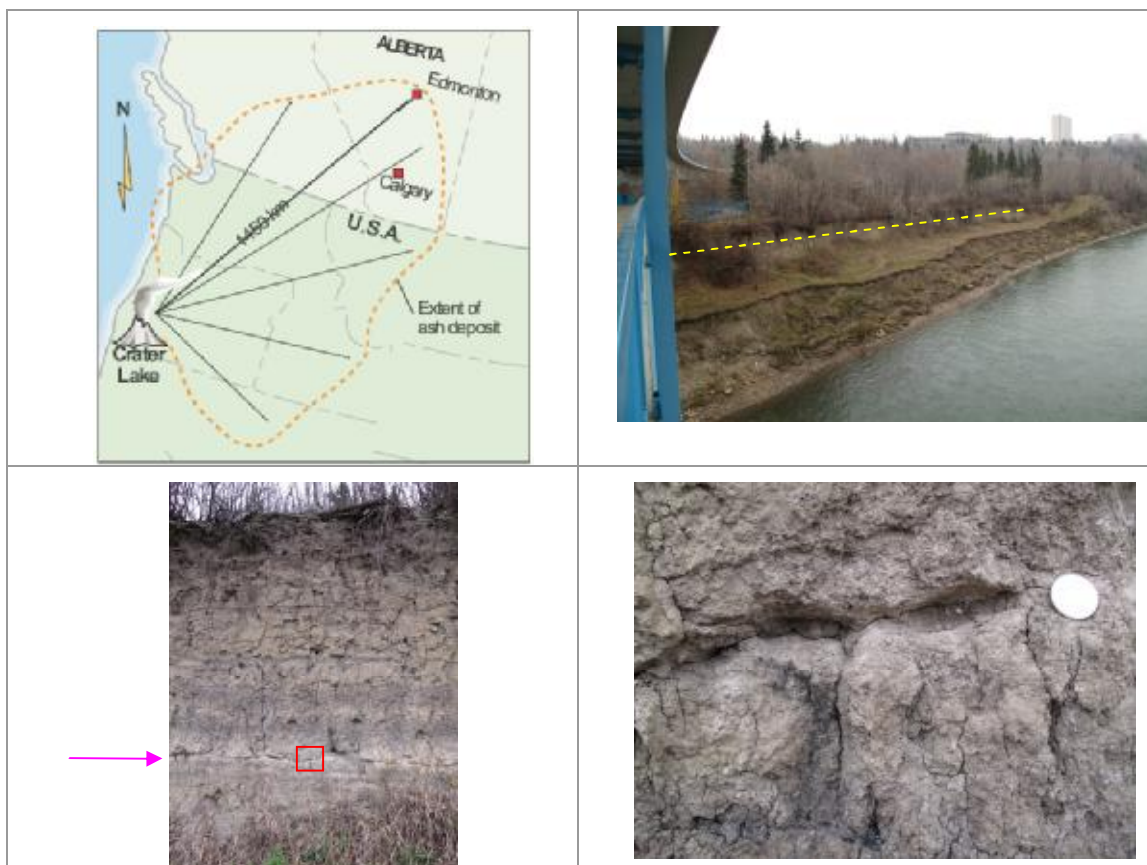


圖 46 愛特蒙頓 North Saskatchewan 河畔火山灰露頭，可能是美國奧勒岡州 Mazama 火山噴發後的產物(圖左上)。這一層火山灰位於圖右上黃色虛線處，圖左下為露頭近照(粉紅色箭頭處)，圖右下為圖左下中紅色框線放大，火山灰厚度約為 1 公分(攝於 2010 年 10 月 23 日)。

2.7 研習亞伯達省公路的土工災害及觀測技術

本項研習內容為拜訪亞伯達省運輸處運輸及土木組(Geotechnical and Material Service, Transportation and Civil Engineering Division, Government of Alberta)組長 Roger Skirrow 及資深工程師 Rocky Wang，研討亞伯達省運輸處對於道路邊坡的山崩處理對策、整治措施及土工監測經驗。

亞伯達省運輸處對於道路邊坡的滑動的調查，除了傳統的測傾管量測外，目前也引進 SAA(ShapeAccelArray)測傾儀，嘗試進行邊坡滑動的自動化即時監測。SAA 可由多組每支 50 公分的測傾桿串連所構成，每支測傾桿間以關節(joint)連結，測傾桿可量測 3 維位移變化，因此可量測每 50 公分區間的 3 維位移量，透過專用軟體並能將各方向的位移量圖表化，邊坡的位移狀況即可一目了然(圖 47)。

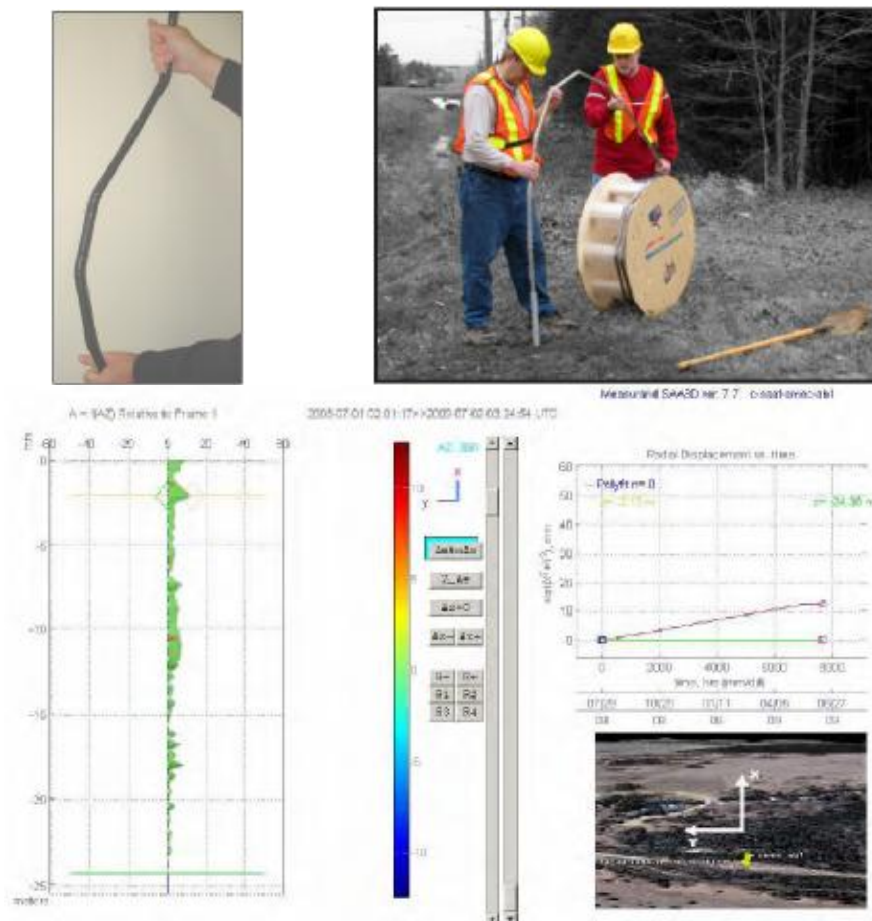


圖 47 SAA(ShapeAccelArray)測傾儀概要，主要由每支 50 公分的測傾桿串連所構成(上圖左)，安裝在一般的鑽孔中(上圖右)；照片摘自 measurand 公司網站。下圖為亞伯達省運輸處在 S26 道路邊坡的量測成果。

2.8 進行山崩判釋與潛勢評估技術經驗交流

本次研習過程中，曾拜訪多個相關單位，辦理 3 場簡報與討論會(表 5)，說明臺灣的自然環境、山崩判釋成果與潛勢評估成果，並與各領域的專家、學者進行山崩判釋與潛勢評估技術的經驗交流。

此外也參加由加拿大地工學會及愛德蒙頓地工學會合辦之講座：瑞士 Sarah Springman 教授專題演講，題目為：“The Rüdlingen Landslide Experiment”。Sarah Springman 教授以瑞士小規模實驗邊坡為例，討論全尺寸的山崩現象、地下水及位移監測等實驗成果。

藉由這些拜訪、簡報及研習行程，許多加拿大的山崩調查分析專家亦對臺灣自然環境的挑戰感興趣，並相互期許雙方未來在山崩調查分析技術方面，能有更進一步的交流機會。

表 5 本次研習中向相關單位辦理簡報說明對象列表

日期	地點	對象	簡報內容
10/26(二)	亞伯達省地質調查所會議室	亞伯達省地質調查所經理 Corey Froese 及地質師共約 30 人	經濟部中央地質調查所在臺灣的地質調查、山崩分析及監測成果
10/28(四)	亞伯達大學土木與環工系教室	亞伯達大學土木與環工系： 1.Rick Chalaturnyk 教授 2.David Cruden 教授 3.Derek Martin 教授 4.TaiHoon Kim(ph.D) 5.Renato Macciotta(ph.D) 6.土木與環工系學生約 40 人	
11/10(三)	卑詩大學地球環境系教室	Ø卑詩大學地球環境系： 1.Oldrich Hungr 教授 2.Keyseok Woo(ph.D) 3.Philipp Fitze(M. Sc.) 4.地球環境系研究生約 10 人 Ø卑詩大學地理系： 1.Marwan Hassan 教授、 2.Dan Moore 教授 3.莊永忠研究員	

三、研習心得

加拿大西部的落磯山脈，由於受到冰河侵蝕下切的影響，地形陡峭，岩層並受變質作用影響導致岩體破碎，有多處大規模岩坡的山崩及土石流案例。除了位於亞伯達省、加拿大歷史中最大規模山崩災害的法蘭克岩體滑動區外，位於西岸、地形陡峭且降雨量大的卑詩省也有許多山崩、土石流災害，因此加拿大地質調查所、亞伯達省地質調查所及許多學校的山崩判釋與分析專家，均已長期投入研究工作並進行評估分析，期望在山崩破壞發生前即能判釋出大規模岩坡的山崩位置與可能影響範圍。這些評估技術及經驗，對於改善與強化臺灣的坡地安全及環境地質問題(如山崩、落石及土石流等)具有實質的助益，對於高山聚落地區附近嚴重的山崩潛勢區判釋及分析評估工作也有幫助。以下為本次研修之研習心得：

1. 大規模山崩的調查分析工作，是一項需要高度專業、技術、人力、資金且必須長期投入的工作。加拿大亞伯達省法蘭克岩體滑動區發生迄今已超過百年，但地工專家對於地質構造、山崩潛勢及影響區範圍的調查分析結果，也一直在改變，甚至必須結合國際相關研究團體的智慧，共同研討及技術研發。這也顯示山崩的地質調查分析工作具有實質的困難度，必須隨著調查成果的增加、調查技術的改進或分析方法的改良，不斷更新。
2. 山崩災害潛勢區的地質條件、水文模式及材料行為(如質流學)，不僅複雜度高，對於地底下的岩體的變形行為更難以具體掌握；這也可以從「山崩分類」(Landslide Classification)迄今仍有許多爭議可見一般。因此多方汲取各國、各種類的山崩案例分析經驗，包括擴大國際合作、辦理國際研討會及參與野外地質考察，對於評析我國的環境地質問題(如山崩、落石及土石流等)，是具有實質幫助的。
3. 由於大自然地質狀況特有的複雜度，有關山崩或土石流災害潛勢的分析與模擬，現場各項參數的取得非常困難，更遑論未發生災害前的山崩潛勢分析。參數的不確定性，仍是目前各種分析評估工作中的盲點，仍必須不斷加強相關研究及強化調查技術，以降低不確定性之影響。

4. 監測僅是山崩預警工作的一環，但絕非山崩防災工作的萬靈丹。每種觀測方法都有其適用環境、分析精度及限制條件，更必須裝設在正確位置，才能發揮岩體滑動監測的功能。此外誘發山崩的原因相當多，無預警的地震、大幅降雨、地下水滲流或坡腳淘刷等，均有可能突然的造成山崩或土石流災害。由於地質災害的種類多元，在立法院剛審議通過的地質法中，就明訂地質災害包括自然或人為引發之地震、海嘯、火山、斷層活動、山崩、地滑、土石流、地層下陷、海岸變遷或其他地質作用所造成之災害。因此從加拿大的經驗來看，監測或預警系統僅是各種類地質災害防範工作的一部分，並且以現今科技而言，仍僅較適宜做為長期趨勢分析之用；但絕無法直接防範山崩的發生。民眾也必須瞭解自主防災的重要性，才能達到減災、避災、離災的目標。
5. 由於岩體滑動的地質材料、地下水狀況、滑動深度、地形地貌特徵迥異，因此每一處大規模的岩體滑動區的山崩監測或預警機制，均應進行個別分析及地工專業判斷，從歷史經驗、監測資料、大地工程分析及數值模擬方法等著手。尤其監測方法日新月異，除了傳統井下及地表的即時監測方式外，許多新的量測科技如利用衛星資料進行 InSAR 位移計算、LiDAR 地形測量或 SAA 測傾儀位移量測等，均值得嘗試應用於岩體滑動區的變形即時監測。
6. 地質模式對於岩體滑動機制的研判影響深遠。一般大地工程分析習以安全係數的分析方式，假定滑動體在厚度有限的滑動面上滑動的可能性。然而大規模的山崩中，其滑動面可能不止 1 處，且變形機制除了滑動外，尚包括岩體的傾翻、潛變或流動。這些地質資料及山崩機制如何反映到數值模型進行分析，將是未來面對的首要課題。
7. 任何一套地質災害的監測及預警系統，都必須仰賴可信的監測儀器及穩定的資料傳輸方式，並制訂標準作業程序，才能全方位的顧及每個可能導致失敗的關鍵流程。由於天候及現場條件的影響，預警系統常有監測儀器故障或訊號不良的現象，這方面加拿大仍持續運用資通訊科技與技術加以改

進，但這項工作必須有長期投入的人力與經費持續為之。中央政府部門與地方機關更應有專責、專業的地工技術團隊，長期進行監測及觀測科技改進，才有能夠發展出適用於我國特有地質條件的山崩判釋分析方法，並進行經驗累積與傳承。地質災害之基本調查、分析、監測及技術研發，是國土保育與國家發展過程中相當重要的一環，唯有透過政府與民眾雙方齊心合力，教育並促進民眾瞭解自主防災的重要性，才能降低山崩災害所帶來的影響。

8. 本次研習的內容及成果，可直接落實在經濟部中央地質調查所進行中的相關防災減災基本地質調查研究計畫，對於地質災害的研究分析方面，也提供幾個問題層面，供政府部門在未來進一步來推動，包括：大規模山崩的影響區評估、山崩引致土石流或堰塞湖分析、山崩潛勢判釋評估技術引進、監測技術研發、地質災害預警系統強化及防災避難標準作業程序制訂等，以提昇我國於重大山崩災害防災方面的技術層面及釐定政策方針。

四、建議

1.加強臺加雙方技術合作

加拿大在山崩判釋及影響區評估技術的發展，已累積豐富的經驗，尤其該國積極嘗試應用最新量測科技與方法，研發輔助分析軟體，發展國際技術合作等，都是領先臺灣的技術。因此若有適合我國所需之部分，應可技術引進並運用於實務，有利於強化臺灣坡地地質災害防救災體系，對地質災害防治實務工作之推動上，確有其實際效益。

2.持續推動國土地質災害潛勢區調查

要達到國土永續經營之目標，長期持續地進行地質災害之基本調查、分析及預測是很重要的工作。尤其經濟部中央地質調查所持續進行相關防災減災基本地質調查研究計畫，甚至是河川集水區中上游沿岸坡地崩塌或產生堰塞湖災害、集水區坡地地質災害調查分析、河岸或道路邊坡崩塌災害等，均需要有長期進行地質災害調查與分析評估資料，以提供相關單位作為災害防治規劃與整治參考。

3.研發坡地潛在大規模山崩的調查技術

自從日本 NHK 報導小林村災害議題並論述深層崩壞現象後，臺灣社會輿論關心政府施政規劃，國家災害防救科技中心也邀集專家學者及相關單位共同研討防災推動策略。事實上無論歐、美、日各國對於深層崩壞或大規模山崩的相關研究上，亦僅屬起步階段，並多僅能針對「已發生」的大規模山崩進行分析，對於「未發生」的大規模山崩高潛勢區判釋及潛勢評估，仍然屬於研究階段。由於臺灣坡地範圍佔國土的大部分面積，並且具有先天複雜而脆弱的地質環境，因此各先進國家的相關研究策略與方法，值得臺灣政府部門深入分析或借鏡。以加拿大山崩調查分析工作的啟發而言，包括應優先針對高風險地區進行山崩潛勢調查、利用衛星資料及 LiDAR 分析技術觀測山崩的動態、加強野外地質調查及檢核、推動山崩及影響區分析模擬技術、強化水文地質觀測方法及引進新型調查觀測科技等，並將這些研究分析成果具體量化

公開，以深化地質災害高潛勢地區地方政府與民眾的危機感，加強當地民眾之自主防災意識。

4.提昇社會大眾對山崩防災的觀念

臺灣近年來對山崩防災及環境保育的觀念倍受重視，乃由於過去十幾年來在歷經集集大地震的重創、多次的颱風豪雨侵襲及莫拉克颱風災情之影響下，不但造成人民生命財產的重大損失，更造成山崩災害頻率及規模大幅提昇，這也讓全國人民更深刻體認到山崩防災及環境保育的重要性。而山崩防災及環境保育之宣導係一長期性的工作，除了繼續加強宣導外，更應將山崩防災的觀念與作法納入生活教育內，俾利落實山崩防災的成效。

五、參考文獻

1. 王文能 (1986) 火山岩崩場地的發生機制與實例。鑛冶，第 30 期第 3 卷，第 131-140 頁。
2. 李錫堤、董家鈞、林銘郎 (2009) 小林村災變之地質背景探討。地工技術，122 期，第 87-94 頁。
3. 葉堃生、李茂園、王韻皓 (2010) 航攝數位影像於防救災工作之應用。航測及遙測學刊，第十五卷第 1 期，第 123-140 頁。
4. 經濟部中央地質調查所 (2009) 莫拉克風災小林村災因分析報告。經濟部中央地質調查所調查資料(未發表)。
5. Bertolo, P. and Bottino, G. 2008. 02.Debris-flow event in the Frangerello Stream-Susa Valley (Italy)—calibration of numerical models for the back analysis of the 16 October, 2000 rainstorm. *Landslide*, vol.5 no.1, p.19-30.
6. Blais-Stevens, A. and Hungr, O. 2007. Landslide hazards and their mitigation along the Sea to Sky corridor. 4th Annual Canadian Risk and Hazards Network Symposium. November 6-8. Vancouver, Canada.
7. Canadian Geotechnical Society. 2010. Frank Slide and Turtle Mountain Early Warning System Technical Tour Guidebook. 34p.
8. Couture, R. and VanDine, D. 2004. Field Trip – Guidebook Some Geological Hazards in North Vancouver and along the Sea-to-Sky Highway British Columbia. Geological Survey of Canada, Open File 4642, 84 p.
9. Cruden, D.M. and Krahn, J. 1978. Frank Rockslide, Alberta, Canada. In:Voight, B. (Ed.),Rockslides and Avalanches. Natural Phenomena, vol. 1. Elsevier, Amsterdam, pp. 97–112.
10. Edmonton Geological Society. 1993. Edmonton Beneath Our Feet – A guide to the geology of the Edmonton region. Published by Edmonton Geological Society, 150 p.
11. Edmonton Geological Society. 2003. Geology of the Frank Slide and southwestern Alberta – guidebook of fieldtrip. 34 p.
12. Hungr, O.; Corominas, J. and Eberhardt, E. 2005. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. In *Landslide Risk Management: Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver. Edited by: Hungr, O.; Fell, R.; Couture, R.; and Eberhardt, E. Leiden: A.A. Balkema, p.99-128.
13. Hungr Geotechnical Research. 2008. Turtle Mountain, Frank, Alberta: runout analyses of potential landslides on South and Third Peaks; unpublished report prepared for Alberta Geological Survey, 51 p.
14. Hungr, O and McDougall, S. 2009. Two numerical models for landslide

- dynamic analysis. *Computers & Geosciences*, 35, p.978–992.
15. Langenberg, C.W., Pană, D., Richards, B.C., Spratt, D.A. and Lamb, M.A. 2007. Structural geology of the Turtle Mountain area near Frank, Alberta; Alberta Energy and Utilities Board, EUB/AGS Earth Sciences Report 2007-03, 46 p.
 16. McDougall, S. and Hungr, O. 2004. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, 41,1084–1097.
 17. McDougall, S. and Hungr, O. 2005. Dynamic modeling of entrainment in rapid landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 42,1437–1448.
 18. Mei S., Poncos V. and Froese C. 2008. Mapping millimetre-scale ground deformation over the Frank Slide and South Peak of Turtle Mountain, Alberta, using spaceborne InSAR technology; Alberta Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Earth Sciences Report 2007-09, 126 p.
 19. Moreno, F. and Froese, C.R. 2009. Turtle Mountain field laboratory, Alberta (NTS 82G): 2008 data and activity summary; Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Open File Report 2009-15, 22 p.
 20. Pedrazzini, Jaboyedoff, Froese, Langenberg & Moreno. 2008. Structures and Failure Mechanisms Analysis of Turtle Mountain. 4th Canadian Conference on Geohazards.
 21. Soe Moe K. W., Cruden D. M., Martin C.D., Lewycky D. and Lach P. R. 2009. Mechanisms and Kinematics of River Valley Landslides in Edmonton. 2009 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Vancouver, British Columbia.

相關網站：

1. 亞伯達省地質調查所(Alberta Geological Survey)網站：
http://www.ags.gov.ab.ca/geohazards/turtle_mountain/turtle_mountain.html
2. 亞伯達省法蘭克岩體滑動解說中心(Frank Slide Interpretive Centre)網站：
<http://www.frankslide.com/home.html>
3. The Frank Slide 網站(By: Benson, Leslie, Lisa, Kevin and Jaffar)：
<http://members.shaw.ca/chuong/geology301/index.htm>

附錄：本次研習參訪照片



與亞伯達省地質調查所研究員 Francisco Moreno 合影(2010.10.19)。



與亞伯達省地質調查所研究員 Francisco Moreno 於龜山山頂合影(2010.10.19)。



與 NAVSTAR 公司 Glen Bjorgan 經理合影(2010.10.20)。



拜訪愛特蒙頓市政府運輸局，與運輸局局長 Don Lewycky 及資深工程師 Paul Lach 合影(2010.10.26)。



拜訪亞伯達省運輸處運輸及土木組，與運輸及土木組組長 Roger Skirrow 合影 (2010.10.27)。



拜訪卑詩大學地球環境系，與 Oldrich Hungr 教授合影(2010.11.12)。

CGS Luncheon Notice

The Kingston Chapter
of the
Canadian Geotechnical Society
invites you to a luncheon on:

Thursday 21 October 2010, 12:00 PM

at the
Kingston Brewing Company (Brew Pub)
where

Dr. Sarah Springman of ETH Zurich will be presenting:

The Rüdlingen Landslide Experiment



Luncheon pricing will be:

\$20 for CGS or PEO members	\$10 for student members
\$25 for non-members	\$15 for student non-members

Lunch is included in this price!

Please RSVP Melissa Chappel at chappel@ce.queensu.ca by **October 19**.

The CGS Kingston Section is sponsored by:



Presentation Summary

The Rüdlingen landslide experiment

A large scale field experiment was conducted on a steep 38° forested slope with preliminary field monitoring of sensors installed at depths from 15 to 150 cm, including tensiometers, TDRs, piezometers, rain gauges, pressure cells, acoustic sensors and deformation probes, prior to triggering a landslide by means of artificial rainfall. The project was designed to enhance the understanding of triggering processes and initiation mechanisms by replicating the effects of a heavy rainfall event in May 2002, in which 100 mm rain fell in 40 minutes, causing 42 surficial landslides. Geotechnical, and hydrological characterisation was carried out on the overlying colluvial silty sand, with bedrock at depths between 0.5 m and 5 m. Percolation of groundwater into the underlying bedrock was observed from test pits. Remote sensing of displacements was also carried out continually during the field experiments, through a photogrammetric monitoring system. It was deduced that the slope would fail during an extreme rainfall experiment that would lead to saturation of the soil overlying the bedrock. The failure mechanism was more or less as predicted, with vegetation reinforcement playing a role. Triggering occurred earlier than expected in March 2009, incorporating about 150 m³ of debris, which was safely retained in a protection net at the base of the slope.

Presenter Biography

Sarah Marcella Springman has been Full Professor of Geotechnical Engineering at the Institute for Geotechnical Engineering at the ETH Zurich since January 1997. She is engaged in the modelling and solving of geotechnical problems.

Prof. Springman was born in 1956 and studied soil mechanics at Cambridge University (1975-1978). Subsequently, she transferred to industry and worked as an engineer on several geotechnical projects in England, Fiji, and Australia. While completing her Master's and Ph.D. degrees at Cambridge, she also pursued an athletic career and won numerous national and international triathlon competitions.

The emphasis of Prof. Springman's research is on geotechnical modelling of soil structure interaction problems. These include design and construction of abutments, pile foundations, reinforced soil and oil drilling structures. She combines physical modelling in a geotechnical centrifuge with numerical modelling so that the data may be used to develop, calibrate or validate new design methods. ETH now possess a 2.2 m drum geotechnical centrifuge which will permit tests to be carried out on a range of geotechnical problems. These will be investigated at small scale but at the correct "field" stress levels, with associated savings in time and money.

Rüdlingen (SH) - Landslide triggering by artificial rainfall



Instrumented slope in Rüdlingen, SH.

a) Field site

The experimental slope is 7.5 m wide by 35 m long, located in the Swiss lowlands on an east facing slope over-looking the river Rhine, at an altitude of ~ 350 masl. Originally there were forestry covertures of circa 80%, heights of 5-20 m. Shrubs up to 1-5 m high and a free herb layer covered ~ 50% of the surface (Schwarz & Rickli, 2008). The average gradient was determined to be from 38° to 43° with a slightly concave surface (Springman et al. 2009). The underlying rock consists mainly of Molasse. Alternate layers of were deposited in the foreland basin of the Alps under the Tethys Sea (Seawater Molasse) and land (Freshwater Molasse). Several augured samples, as well as an outcrop of the bedrock about 20 m above the selected field, revealed horizontal layering of fine grained sand- and marlstone at the test site (Tacher & Locher, 2008). The sandstone was later proven to be highly permeable and fissured (Brönniman et al. 2010). Grain-size distributions were determined and the soil was classified as medium-low plasticity silty sand (Springman et al. 2009).

b) Site instrumentation

Measurements of soil suction, groundwater level, soil volumetric water content, rain intensity and soil temperature were taken and combined with geophysical monitoring using Electrical Resistance Tomography (REF), investigations into subsurface flow by means of tracer experiments. Deformations were monitored during the experiment, both on the surface via photogrammetrical methods and within the soil mass, using a flexible probe equipped with strain gauges at different points and two axis inclinometers on the top (Askarinejad 2009) and acoustic sensors (Michlmayr et al. 2008). Instruments were installed mainly in three clusters at depths of

15, 30, 60, 90, 120, and 150 cm below the ground surface over the slope (Askarinejad et al. 2010) including jet-fill tensiometers, TDRs, Decagon TDRs, piezometers, soil temperature sensors, deformation probes, earth pressure cells, acoustic sensors and rain gauges.



Location of instrumentation clusters (Cl. 1 – 3), the sprinklers and the photogrammetry cameras.

c) Experiments

A sprinkling experiment was carried out in autumn 2008 to investigate the hydrological and mechanical response of the slope, followed by a second one to trigger a landslide in spring 2009.

d) Data availability

All measured data concerning soil suction, water level, soil volumetric water content, rain intensity, and soil temperature are available on the TRAMM ftp for members.

e) Contact

Amin Askarinejad, Institute for Geotechnical Engineering (IGT), ETH Zürich
amin.askarinejad@igt.baug.ethz.ch

f) References

Askarinejad, A., Casini F., Kienzler, P., Springman, S. M., 2010. Comparison between the in situ and laboratory water retention curves for a silty sand. Submitted to 5th *International Conference on Unsaturated Soils*, Barcelona, Spain.

Springman, S.M., Kienzler, P., Casini, F., Askarinejad, A., 2009. Landslide triggering experiment in a steep forested slope in Switzerland. 17th *International Conference of Soil Mech. & Geot. Eng.* Alexandria, Egypt: 1698 - 1701.