

出國報告（出國類別：出席國際會議）

2018 ISRM International Symposium
10th Asian Rock Mechanics Symposium
2018年ISRM國際研討會
第十屆亞洲岩石力學研討會

服務機關：國防大學理工學院環境資訊及工程學系

姓名職稱：李宏輝上校副教授兼任系主任

派赴國家：新加坡

出國期間：2018年10月30日至2018年11月3日

報告日期：2018年12月7日

摘要

由國際岩石力學學會舉辦的第10屆亞洲岩石力學研討會為亞太地區岩石力學相關領域(大地工程、隧道工程與邊坡工程)二年一度之國際學術研討會，本屆研討會主題為「基礎設施和資源開發中的岩石力學」，亞洲正在見證世界上基礎設施和資源開發的最大增長和需求，根據亞洲開發銀行(Asian Development Bank)的數據，2020年之前需要投入大約8萬億美元用於整體國家基礎設施，其中68%用於新增產能，而岩石力學和岩石工程將在許多這些基礎設施和資源開發項目中發揮關鍵作用。藉由此次國際研討會的參與，瞭解亞洲各國在岩石力學相關領域的發展近況，尤其是隧道與邊坡工程之應用與最新技術，及核廢料深層處置場址之最新資訊，並且掌握岩石動力學在各種實務課題的可能應用，亦透過與會者之間的討論增進學術交流。

目次

一、前言	1
二、目的	1
三、會議議程與論文	1
四、與會過程	2
五、會議議題重點	6
六、心得與建議	16
七、致謝	16

一、前言

由國際岩石力學學會(International Society for Rock Mechanics, ISRM)舉辦的第10屆亞洲岩石力學研討會(10th Asian Rock Mechanics Symposium)於2018年10月29日至11月3日在新加坡新達城(Suntec City)展開為期6天的議程(如表1)，其中包含短期課程、主題演講及議題研討等豐富內容，為亞太地區岩石力學相關領域(大地工程、隧道工程與邊坡工程)二年一度之國際學術研討會。除本校外，我國臺灣大學、交通大學、成功大學、臺北科技大學土木相關科系所與民間土木工程顧問公司均有組團參加，我國與會人員留影如圖1。

表1 第十屆亞洲岩石力學簡要議程

MON – 29 OCT 2018 Short Courses Workshop ISRM Board Meeting & Dinner	WED - 31 OCT 2018 Opening Ceremony Keynote Lectures Concurrent Sessions Exhibition & Poster Display Welcome Reception	FRI – 02 NOV 2018 Keynote Lectures Concurrent Sessions Closing Ceremony Exhibition & Poster Display Tear Down/Ship Out
TUE - 30 OCT 2018 Short Courses Workshops Regional Council Meetings ISRM Commission Meetings ISRM Council Meeting ISRM Council Reception	THU – 01 NOV 2018 Keynote Lectures Concurrent Sessions Exhibition & Poster Display Symposium Banquet	SAT - 03 NOV 2018 Technical Visits (Half-Day)



圖1 第10屆亞洲岩石力學研討會我國與會人員留影

二、目的

此行目的，在於了解亞洲各國在岩石力學相關領域的發展近況，尤其是隧道與邊坡工程之應用與最新技術，及核廢料深層處置場址之最新資訊，並且掌握岩石動力學(Rock Dynamics)在各種實務課題的可能應用，亦透過與會者之間的討論增進學術交流。

三、會議程與論文

本屆亞洲國際岩石力學研討會的主題為「基礎設施和資源開發中的岩石力學(Rock Mechanics in Infrastructure and Resource Development)」，大會會議議程包括開幕式、大會演講、專題演講、主題報告、青年學者論文演講、論文口頭發表與海報發表、閉幕式及會後工程參

觀等，會議議程、大會演講與專題演講講題如表2所示。

研討會論文投稿領域區分為「岩石屬性和岩體特徵(Rock property and rock mass characterization)、岩石動力學(Rock dynamics)、採礦工程(Mining engineering)、岩石隧道和洞穴(Rock tunnel and caverns)、數值建模和設計方法(Numerical modelling and design methodologies)、岩石工程中的環境影響和風險評估(Environmental impact and risk assessment in rock engineering)、現場調查和監測(Site investigation and monitoring)、採礦和岩石工程中的智能技術(Smart technologies in mining and rock engineering)、特殊岩石工程專案和案例研究(Special rock engineering projects and case studies)、岩石力學/工程學的新領域(New frontiers in rock mechanics/engineering)及岩坡工程(Rock Slopes)」等11項主題，如表3所示，最後收錄的論文篇數(含海報發表)計246篇。論文發表係自各主題收錄論文中選擇部份以演講型式發表，海報發表則由大會提供A0尺寸空間由作者準備海報發表，各主題口頭發表與海報發表論文數量一併整理於表3中。

四、與會過程

本屆大會在主議程進行前2天(10月29、30日)開設了短期課程(Short Courses)，其主題包括了岩石隧道(Rock Tunnelling)、結構地質與應用岩石力學的整合(The integration of structural geology and applied rock mechanics)、現地試驗(In-Situ Rock Testing)、碳氫化合物地下岩石洞穴中液化天然氣研究(Underground Rock Caverns for Hydrocarbons with Focus on LNG)及地熱能(Geothermal Energy)。本人出席會議期間之行程摘述如表4所示，活動紀錄照片如圖2至圖5所示，期間參與的會議議題重點於項次五詳述。

表1 第十屆亞洲岩石力學研討會議程表

Wednesday, 31 October 2018			
Registration: 07:30 - 18:00 (Level 3)			
ARMS10 OPENING CEREMONY & KEYNOTES: 08:30 - 10:30 (Summit 2)			
<p>Keynote 1: "Mining Rock Mechanics in China" Manchao HE, China University of Mining and Technology (Beijing), China</p> <p>Keynote 2: "Key Complex Process Couplings and Challenges in the Effective Recovery of Deep Geothermal Energy" Derek EL SWORTH, Pennsylvania State University, USA</p> <p>Keynote 3: "Eurocode 7: Genesis, Development and Implications for Rock Engineering" John HARRISON, University of Toronto, Canada</p>			
POSTER SESSION 1 & AM Break: 10:30 - 11:00 (Summit 1)			
Authors Set Up Posters: From 08:30am; Must Complete by 10am			
G: Site Investigation and Monitoring	I: Special Applications and Case Studies	A: Rock Property and Rock Mass Characterization	E: Numerical Modelling and Design Methodologies
B: Rock Dynamics	H: Smart Technologies in Mining and Rock Engineering	D: Rock Tunnel and Caverns	F: Environment Impact and Risk Assessment in Rock Engineering
ORAL SESSIONS: 11:00 - 12:30 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
A1: Rock Property and Rock Mass Characterization	B1: Rock Dynamics	C1: Mining Engineering	E1: Numerical Modelling and Design Methodologies
Lunch Buffet: 12.30 - 13:30 (Nicoll)			
ORAL SESSIONS: 13:30 - 15:30 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
A2: Rock Property and Rock Mass Characterization	G1: Site Investigation and Monitoring	C2: Mining Engineering	J: New Frontiers in Rock Mechanics/Engineering
PM Break: 15:30 - 16:00 (Summit 1)			
ORAL SESSIONS: 16:00 - 18:00 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
A3: Rock Property and Rock Mass Characterization	D1: Rock Tunnel and Caverns	F: Environmental Impact and Risk Assessment in Rock Engineering	I1: Special Applications and Case Studies
WELCOME RECEPTION & STUDENT NIGHT: 18:00 - 21:00 (Summit 1)			
"Ticketed Event - 1 Ticket Admits ONE Person Only"			

表1 第十屆亞洲岩石力學研討會議程表(續)

Thursday, 01 November 2018			
Registration: 08:00 - 17:00 (Level 3)			
PLENARIES: ROCHA MEDAL & YOUNG RESEARCHERS: 08:30 - 10:15 (Summit 2)			
<u>Rocha Medal Award & Lecture: "The Design and Behaviour of Crush Pillars on the Merensky Reef"</u> Michael DU PLESSIS, <i>University of Pretoria, South Africa</i>			
Young Researcher Plenary Session <u>"Thermally-induced Microcracking in Granites: Insights from SEM Observation and DEM Modeling"</u> Zhihong ZHAO, <i>Tsinghua University, China</i>			
<u>"Joint Trace Detection in Digital Images"</u> Andreas BUYER, <i>Graz University of Technology, Austria</i>			
<u>"Properties of Large-scale Geological Features and Seismic Responses Affecting Strainburst Potential in Deep Underground Mines"</u> Audrey GOULET, <i>Université Laval, Canada</i>			
POSTER SESSION 2 & AM Break: 10:15 - 10:45 (Summit 1)			
<u>A: Rock Property and Rock Mass Characterization</u>	<u>D: Rock Tunnel and Caverns</u>	<u>J: New Frontiers in Rock Mechanics/Engineering</u>	<u>C: Mining Engineering</u>
<u>E: Numerical Modelling and Design Methodologies</u>			
ORAL SESSIONS: 10:45 - 12:30 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
<u>A4: Rock Property and Rock Mass Characterization</u>	<u>G2: Site Investigation and Monitoring</u>	<u>C3: Mining Engineering</u>	<u>H1: Smart Technologies in Mining and Rock Engineering</u>
Lunch Buffet: 12.30 - 13:30 (Nicoll)			
ORAL SESSIONS: 13:30 - 15:30 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
<u>A5: Rock Property and Rock Mass Characterization</u>	<u>D2: Rock Tunnel and Caverns</u>	<u>ECF: Early Career Forum</u>	<u>K: Rock Slopes</u>
PM Break: 15:30 - 16:00 (Summit 1)			
ORAL SESSIONS: 16:00 - 18:00 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
<u>A6: Rock Property and Rock Mass Characterization</u>	<u>B2: Rock Dynamics</u>	<u>ECF: Early Career Forum</u>	<u>E2: Numerical Modelling and Design Methodologies</u>
ROCK BOWL: 17:30 - 18:30 (Nicoll)			
SYMPOSIUM BANQUET: 18:30 - 21:00 (Nicoll)			
<i>"Ticketed Event - 1 Ticket Admits ONE Person Only"</i>			
Friday, 02 November 2018			
Registration: 08:00 - 16:00 (Level 3)			
PLENARIES: ISRM FRANKLIN AWARD & KEYNOTES: 08:30 - 10:15 (Summit 2)			
ISRM Franklin Award & Lecture: <u>"Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical Couplings that Define the Evolution of Flow and Transport Behavior in Fractured Rocks"</u> Hide YASUHARA, <i>Enime University, Japan</i>			
Keynote 4: <u>"Rock Fracturing by Low Power Microwave Treatments – Observation, Mechanism and Application"</u> Jian ZHAO, <i>Monash University, Australia</i>			
Keynote 5: <u>"The Roles of Higher-Frequency Waves in "Unexpected" Problems of Earthquakes"</u> Koji UENISHI, <i>The University of Tokyo, Japan</i>			
AM Break: 10:15 - 10:45 (Summit 1)			
ORAL SESSIONS: 10:45 - 12:30 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
<u>A7: Rock Property and Rock Mass Characterization</u>	<u>D3: Rock Tunnel and Caverns</u>	<u>G3: Site Investigation and Monitoring</u>	<u>H2: Smart Technologies in Mining and Rock Engineering</u>
Lunch Buffet: 12.30 - 13:30 (Nicoll)			
ORAL SESSIONS: 13:30 - 15:30 (Level 3 Meeting Rooms)			
Summit 2	MR325	MR324	MR326
<u>I2: Special Applications and Case Studies</u>	<u>D4: Rock Tunnel and Caverns</u>	<u>B3: Rock Dynamics</u>	<u>E3: Numerical Modelling and Design Methodologies</u>
PM Break: 15:30 - 16:00 (Summit 1)			
Poster Teardown: From 16:00, Latest by 18:00			
KEYNOTES, ROCK BOWL PRIZE PRESENTATION & CLOSING: 16:00 - 18:00 (Summit 2)			
Keynote 6: <u>"Rock Mechanics Developments in Singapore"</u> Zhiye ZHAO, <i>Nanyang Technological University, Singapore</i>			
Keynote 7: <u>"Failure of Anisotropic Rocks such as Shales, and Implications for Borehole Stability"</u> Robert ZIMMERMAN, <i>Imperial College London, United Kingdom</i>			
AWARD PRESENTATIONS & ARMS10 CLOSING CEREMONY			

表3 第十屆亞洲岩石力學研討會論文發表場次與篇數

編號	議程名稱	發表 篇數
A.	岩石屬性和岩體特徵(Rock property and rock mass characterization)	41
B.	岩石動力學(Rock dynamics)	19
C.	採礦工程(Mining engineering)	19
D.	岩石隧道和洞穴(Rock tunnel and caverns)	27
E.	數值建模和設計方法 (Numerical modelling and design methodologies)	20
F.	岩石工程中的環境影響和風險評估(Environmental impact and risk assessment in rock engineering)	7
G.	現場調查和監測(Site investigation and monitoring)	19
H.	採礦和岩石工程中的智能技術(Smart technologies in mining and rock engineering)	11
I.	特殊岩石工程專案和案例研究(Special rock engineering projects and case studies)	14
J.	岩石力學 / 工程學的新領域 (New frontiers in rock mechanics/engineering)	7
K.	岩坡工程(Rock Slopes)	7
	Poster(海報發表)	55

表4 出席會議期間之行程摘述

日期與時間	行程摘述
10/30(二) 05:30	自國防大學理工學院出發至桃園國際機場，搭乘 08:20 班機，13:05 抵達新加坡樟宜機場，15:00 抵達新達城，入住飯店
10/31(三) ~11/2(五)	研討會報到暨海報陳展，如圖 1 至圖 5
11/3(六) 11:00	離開飯店前往樟宜機場，搭乘 14:05 班機，18:45 抵達桃園國際機場

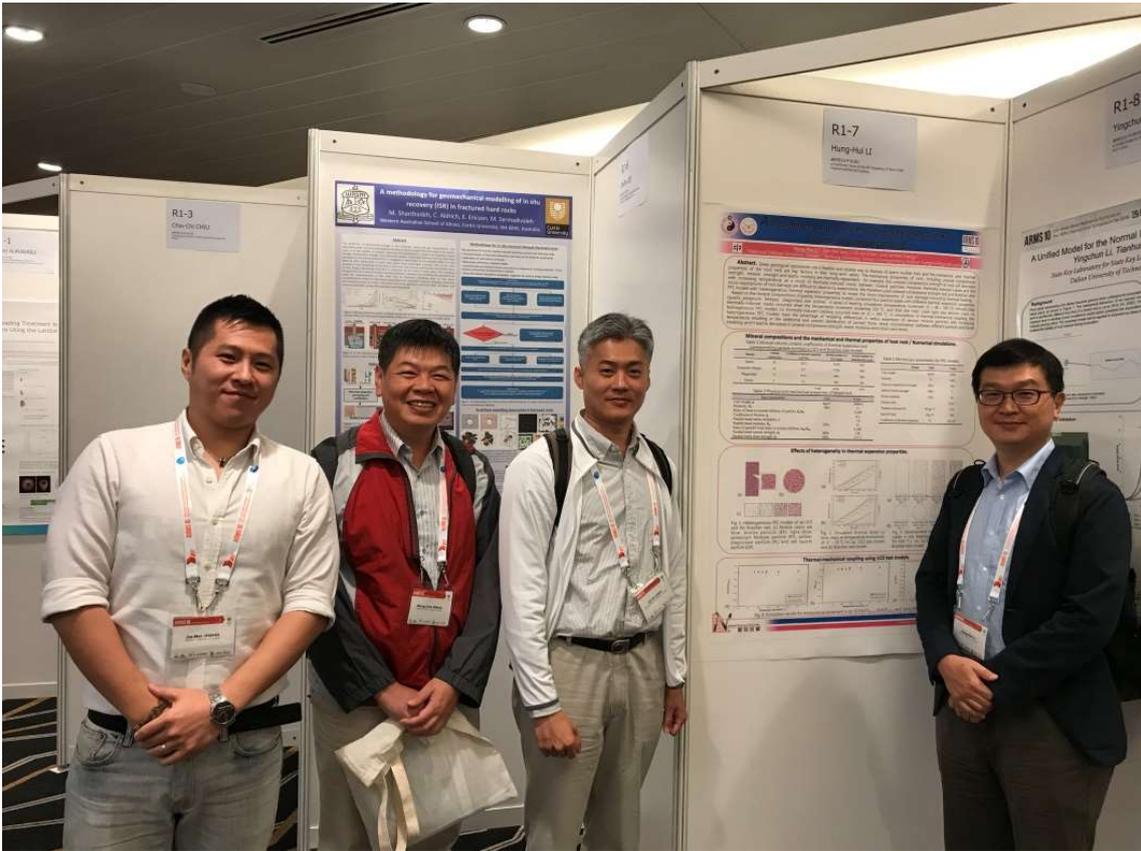


圖 2 交通大學翁孟嘉教授(左二)、國防大學理工學院環資系副教授李宏輝(右一)、博士班研究生陳祺杰(右二)及碩士班研究生張嘉偉(左一)與陳展海報前合影



圖 3 與會人士討論現況

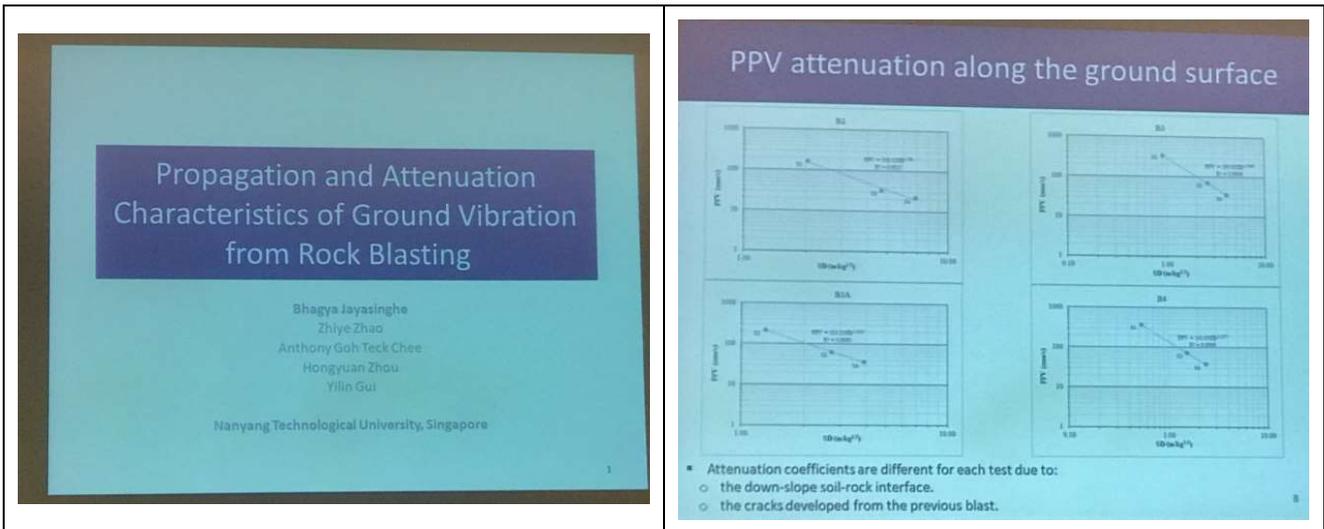


圖4 與會者 Laddu Bhagya Jayasinghe發表「岩石爆破引致地表震動的傳播與衰減特性」(Propagation and Attenuation Characteristics of Ground Vibration from Rock Blasting)(2018)

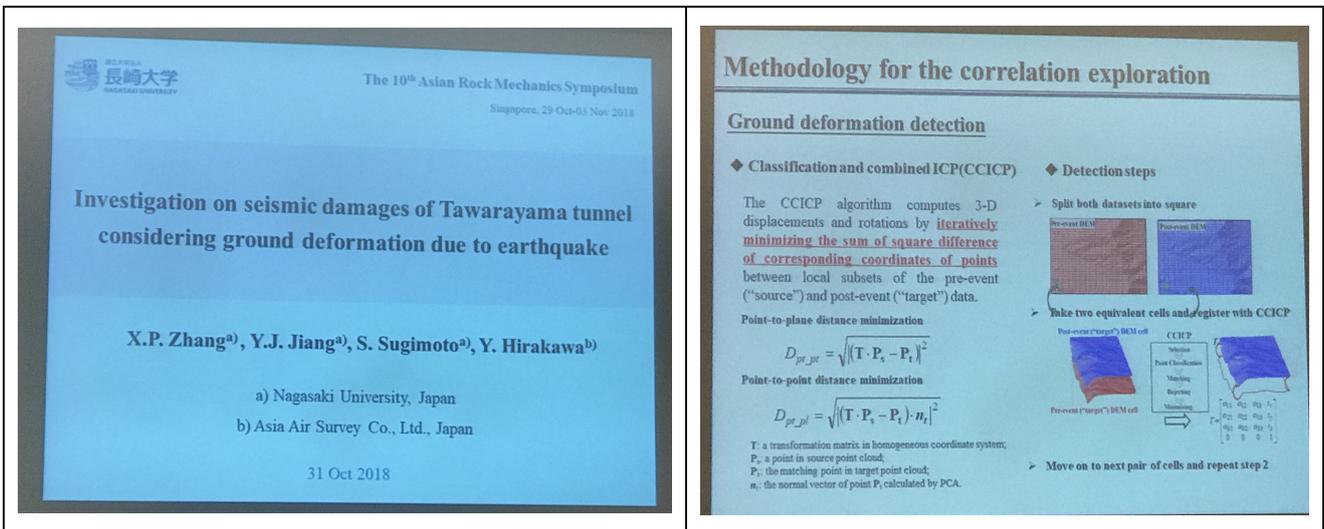


圖5 日本與會者 Xuepeng Zhang發表「考量地震引致地表變形對Tawarayama隧道受震破壞之研究」(Investigation on Seismic Damages of Tawarayama Tunnel Considering Ground Deformation Due to Earthquake)(2018)

五、會議議題重點

本次技術研討包括了主題演講(Keynotes)、大會演講(Lecture)、青年研究者演講(Young researchers)、口頭報告(Oral Presentation)與海報研討(Poster Presentation)，其主題如前述表3所列11個項次。針對參與的議程及本人發表的研究成果，本報告擷取相關重點說明如后：

5.1 主題演講

5.1.1 關鍵的複雜過程耦合和有效回收深層地熱能的挑戰(Key Complex Process Couplings and Challenges in the Effective Recovery of Deep Geothermal Energy)(Derek Elsworth, 2018)

主講人Derek Elsworth教授，美國賓夕法尼亞州立大學能源與礦物工程系、地球科學與地質力學、地質流體和地質災害中心的教授。本研究討論了在熱-水-機械-化學和生物(THMC-B)效應和反饋特別強的複雜系統中滲透率演變的關鍵控制。在相關的短時間尺度上，滲透率主

要由變形驅動-反過來又由總應力，流體壓力或熱和化學效應的變化引起。這些變形可以是本質上穩定的或不穩定的，導致抗震或地震變形，造成由變形模式調節的滲透率的變化。本研究描述了實驗和模型，以表示礦物學、質地、規模和超壓在裂縫性能的摩擦，穩定性和滲透性演變中的各自作用。通過參數研究和分析探索這些觀察到的行為的物理特性。

5.1.2 歐洲規範7：岩石工程的起源、發展及影響(Eurocode 7: genesis, development and implications for rock engineering)(John Harrison, 2018)

演講者John Harrison，多倫多大學工程岩石力學教授，一直致力於開發裂隙岩體工程極限狀態設計原則，目前擔任主持的歐洲岩石機械和岩石工程專家組，協助修改歐洲規範7。本研究提到在過去的十年中，以設計代碼EN-1997 Geotechnical Design(通常稱為Eurocode 7或EC7)的形式出現了一種具有革命性的岩土工程設計方法。本文回顧了EC7的發展及其所採用的設計理念的基礎，即極限狀態設計(LSD)，然後展示了LSD目前如何在EC7中實施。接下來，探討將LSD應用於岩石工程設計的關鍵問題，然後回顧一下即將修訂的EC7(計畫於2020年)將如何改進岩石工程設計的適用性。在這些章節中，突顯出了需要發展習慣岩石工程設計實踐以符合LSD原則的領域。

5.1.3 中國採礦岩石力學(Mining Rock Mechanics in China)(Manchao HE, 2018)

演講者Manchao HE，現任中國科學院院士，北京中國礦業大學(CUMTB)教授，以及中國北京地質力學與深部地下工程國家重點實驗室主任，曾擔任國際岩石力學學會(ISRM)副主席，ISRM教育基金委員會主席。本研究提到，隨著中國礦業活動的增多，山體滑坡、岩爆、大變形等一系列災害頻繁發生，最大的挑戰，在於找到適當的對策。它們可分為三類：滑坡監測、岩爆控制和創新採礦技術的使用。本報告首先介紹了雙塊力學理論的研究，包括牛頓力的測量，這是通過塊體運動引發滑坡災害的必要和充分條件，使用所謂的恆定阻力和具有負泊松比效應的大變形。其次，介紹了岩爆及其控制的實驗。作為岩爆控制的一種重要方法，採用了一種新型吸能岩栓，其特點是在衝擊載荷下具有恆定阻力，並具有大伸長率，可以在爆破多發條件下容納岩體的大變形。本文最後介紹一種新的長壁開採方法，即所謂的110採礦方法(1個工作面，1個開挖巷道和無支柱)，包括定向預分裂切割。與傳統的長壁開採方法相比，所謂的121採礦方法(1個工作面，2個開挖巷道和1個剩餘支柱)，採用新的110採礦方法，不再需要挖掘50%的巷道，是由人為控制的隧道頂拱屋頂坍塌而成的。透過減少對道路挖掘的需求，可以顯著降低採礦事故並降低成本。

5.1.4 高頻波在“無法預期的”地震問題中的作用(The Roles of Higher-Frequency Waves in "Unexpected" Problems of Earthquakes)(Koji Uenishi, 2018)

演講者Koji Uenishi，東京大學工學部航空航天研究科先進能源系教授。該研究提到，地震產生的震波在地下、海洋和大氣中傳播，然而與固體中的其他動態破裂現象一樣，破裂主要發生在隱蔽處。岩石和岩石類材料中動態破裂的多尺度複雜性，使得對破裂發展和相關物理事件之基本機制的理解更加困難。因此，地震學不直接考慮震源周圍的精確力學程序，並且主要根據地震圖估計運動源參數。該研究透過處理一些意外地震引致破壞的實例，探討特殊地震災害背後的機制。分析結果指出，在地震引致的破壞研究上，需要考慮動態在頻率超過1Hz的影響，並以系統性的解釋異常現象，以減少地震造成的意外損害。

5.1.5 低功率微波處理岩石壓裂-觀測，機制和應用(Rock fracturing by low power microwave treatments – observation, mechanism and application)(Jian Zhao, 2018)

演講者Jian Zhao，澳大利亞莫納什大學土木工程系教授，莫納什大學東南大學聯合研究所副院長。本研究指出，採用低功率微波處理誘導硬岩中的微裂縫，以輔助破碎岩石，現已對常見的岩石礦物和硬岩進行實驗測試。透過測量和分組常見礦物的介電特性（吸收微波能量和加熱速率反映的能力），如黑雲母和角閃石可作為良好的微波吸收劑，正長石、石英、斜長石、橄欖石及白雲母可作為微波吸收劑，用於預測岩石的介電性質。本研究並對選定之硬岩上進行測試，觀察和測量加熱速率、空間溫度分布、超聲波速度、強度、裂縫模式及裂縫密度。研究結果指出，單模型微波系統可顯著削弱一些硬岩；而在不同礦物組成和不同飽合條件下的岩石進行系統試驗結果顯示，微波加熱可能引發3種岩石破裂機制，分別為不同礦物熱膨脹，礦物相變和孔隙水蒸發。研究總結指出，微波技術在TBM、掘進機和破碎機中的應用，可協助硬岩進行機械開挖。

5.1.6 新加坡的岩石力學發展(Rock mechanics developments in Singapore)(Zhiye Zhao, 2018)

演講者Zhiye Zhao，新加坡南洋理工大學土木與環境工程學院副教授，南洋理工大學南洋地下空間中心主任，其研究重點是岩石力學/工程中的數值模擬領域，包括不連續變形分析（DDA）的發展、岩栓模型、動態/爆炸荷載下的岩洞響應、耦合水力學模型和岩石灌漿數值模擬。本演講包括兩部分：第一部分概述新加坡在過去30年中利用地下空間，包括過去的重點項目、潛在的未來發展，以及在地下空間開發中面臨的挑戰。第二部分介紹南洋理工大學南陽地下空間中心開展的一些重點研發工作，包括：(1)在DDA/FEM耦合分析和水文地質耦合分析領域開發非連續變形分析(DDA);(2)與日本Kajima合作，使用實驗來驗證數值模擬;(3)在NTU/SINTEF(挪威)和NTU/KTH合作下，建立灌漿模型和模擬以及灌漿設計中的數據挖掘，提出了新的流動模型，並進行了二維和三維模擬，將可用的實驗室測試數據用於驗證研究;(4)提出岩石爆破對附近環境的影響，包含了結構損壞以及對社會/心理影響。

5.1.7 頁岩等各向異性岩石的破壞及其對鑽孔穩定性的影響(Failure of Anisotropic Rocks such as Shales, and Implications for Borehole Stability)(Robert Zimmerman, 2018)

演講者Robert Zimmerman，英國倫敦帝國理工學院岩石力學教授，負責岩石力學和裂隙岩石水文學的研究，以應用於石油工程、地下採礦、碳封存和放射性廢物處理。本研究指出，在頁岩等各向異性岩石中，引起剪切破壞所需的最大主應力值不僅取決於其他兩個主應力，還取決於最大主應力與層面平面法線之間的角度 β 。根據Jaeger的弱面模型，對於 β 接近 0° 或 90° 將發生破壞，且破壞平面將穿過層面。在中間角度，沿著層面會發生破壞，其應力由層面的強度參數決定。經對頁岩試體進行三軸試驗，透過不同圍壓和一系列 β 角，發現數值分析可以很好地擬合4個弱面模型（Ambrose and Zimmerman, ISRM, 2015），並基於上述研究，開發一種用於頁岩鑽孔穩定性的模型，完全異向性的Lekhnitskii – Amadei 解析方法應用於計算井壁周圍的應力。Mogi-Coulomb破壞準則（Al-Ajmi & Zimmerman, IJRMMS, 2005）用於“完整岩石”的強度，弱面模型用於層面的強度。該模型可用於預測任意鑽孔方向和各異向性比率下，避免剪切破壞所需的最小泥漿重量（Setiawan and Zimmerman, SPE, 2018）。結果指出在井眼穩定性分析中，使用異向性彈性模型對應力和使用真三軸破壞準則的重要性。

5.2 大會演講

5.2.1 Merensky Reef上的壓碎柱體的設計和行為(The design and behaviour of crush pillars on the Merensky Reef)(Michael du Plessis, 2018)

演講者Michael du Plessis博士，為隧道支柱領域的研究者。本次演講，主要報告鉑礦中支柱系統的設計、應用和行為方面的缺失。南非的鉑礦中常見深長板狀支柱，用於採礦場支撐。有效的擠壓支柱(crush pillars)設計可確保在採礦工作面上形成支柱，當支柱的寬高比約為2:1時會發生擠壓行為。一旦支柱壓碎，局部支撐力將由柱體內的殘餘應力來提供。由於該採礦區鉑金屬產量佔世界總產量70%，因此優化佈局和支柱設計以確保安全性和採礦，是一個相當重要的問題，研究目的是確定影響擠壓支柱行為的參數。本研究透過以不連續邊界元素法模擬軟體建立極限平衡模型，據以解釋壓碎柱應力演變過程。研究結果指出，支柱的應力取決於其相對於採煤工作面的位置、大小、地質構造的影響、佈局、岩體參數和採動深度。

5.2.2 熱-水-力學-化學耦合，定義裂隙岩石中流動和運輸行為的演變(Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical Couplings that Define the Evolution of Flow and Transport Behavior in Fractured Rocks)(Hide Yasuhara, 2018)

演講者Hide Yasuhara，日本愛媛大學理工學研究科教授。Yasuhara博士的研究主要涉及岩石力學和工程、地球物理學、地球化學、斷層力學、計算力學、多孔裂隙岩石的流動和輸運，以及耦合熱學-水-力學-化學問題，例如高水平放射性廢物和二氧化碳的封存，以及地下能量的回收（例如，地熱能，非常規石油和天然氣，甲烷水合物）。在考慮放射性廢物和人為二氧化碳的能量副產物的封存以及地下能量的有效回收時，檢查裂隙岩石的流動和運移行為具有重要意義。低滲透性岩體內的流體流動，通常由貫穿切割裂縫主導。環境應力和溫度條件的變化，應透過組合的力學-化學相互作用影響這些管道的輸送特性。本研究一直在尋求對天然裂縫和裂隙岩石的水力和運送特性的熱耦合、水力、力學和化學控制。在演講中，還提出了在各種圍壓和溫度條件下岩石裂縫中水流通實驗的結果。最後，運用耦合THMC數值模型提出預測岩石滲透率的長期變化。

5.3 青年研究員

5.3.1 花崗岩中的熱致微裂紋：SEM觀察和DEM建模的見解(Thermally-induced Microcracking in Granites: Insights from SEM Observation and DEM Modeling)(Zhihong Zhao, 2018)

演講者Zhihong Zhao，中國清華大學土木工程系的副教授。主要研究裂縫岩石中的熱-水-力學-化學（THMC）技術，主要應用於深層地下工程，如增強地熱系統，地下核廢料處理庫和地下儲能。本研究說明有關加熱或加熱-冷卻循環對花崗岩力學性能的影響。從微裂紋的角度來看，透過掃描電子顯微鏡（SEM）和離散元素法（DEM）模擬軟體的應用與研究結果顯示，花崗岩的溫度與力學性質具有相依的機制。SEM觀察和DEM模擬均可觀察出，現地溫度超過溫度門檻值，熱將導致微裂紋急劇增加。在熱處理後的花崗岩中觀察到晶間和晶內微裂紋，其中晶體間微裂紋具有破壞主導優勢。溫度的持續升高通常會將降低花崗岩強度，主要是因為熱使得拉伸微裂紋產生。加熱-冷卻循環後花崗岩的弱化，則由熱誘導的微裂紋所引致。隨著晶粒尺寸的增加，熱處理導致的花崗岩的張力強度(巴西人法試驗求得)降低幅度變小，而粒度分佈的不均勻性增加，則大幅降低張力強度，係岩體中熱致微裂紋的長度和數量所致。

5.3.2 大型地質特徵和地震響應的特性影響深埋井下的應變爆發潛力(Properties of Large-scale Geological Features and Seismic Responses Affecting Strainburst Potential in Deep Underground Mines)(Audrey Goulet, 2018)

演講者Audrey Goulet女士，拉瓦爾大學碩士，與加拿大魁北克省的LaRonde礦冶工業共同進行研究。本論文的主要闡述在於開發深井地下礦場的綜合地質力學模型和相關分析工具。Strainburst指的是局部小地震事件，在持續的開採中產生淺層剝落，劇烈彈射碎片。這種岩爆類別可能會影響工人的安全和採礦產能。該研究初步探討了大範圍地質特性、礦山作業背景及產生應變爆炸的抗震和地震響應的特性。本研究使用LaRonde所屬礦場作為案例，定義並說明了影響應變突發事件和嚴重程度的關鍵參數。與岩石的距離和彈射的方向，為礦場的應變爆發潛力和嚴重性的參數。研究結果指出，產生應變爆破的分析地震事件的局部震級平均為 -0.7 ± 0.5 ，位於距損壞處3至58m之間；而應變爆發主要發生在發展爆炸後的5天內。

5.4 口頭及海報報告

5.4.1 利用統計分析對Goldcorp Eleonore礦山地質力學採礦場優化的貢獻(Contributions to Geomechanical Slope Optimization at the Goldcorp Eleonore Mine Using Statistical Analysis)(Sebastien Guidoa and Martin Grenon, 2018)

本研究由加拿大魁北克的Sebastien Guidoa及Martin Grenon所發表。採礦場性能是相當重要，常需在採礦作業中進行評估。然而，採礦場性能的控制因素（例如過度破壞）總是難以完全理解與掌握。本研究以Goldcorp Eleonore礦場為案例，介紹一個由2014年7月至2016年11月間共計105個採場數據資料庫，從中整理出50多個參數，定義了空間、幾何、力學、地質和採場等各方面性能。透過各種統計分析技術可獲得較佳的預測結果，例如多元線性回歸（MLR）、二元邏輯回歸和主成分邏輯回歸（PCLR）。本研究介紹了這些統計技術及其結果，並與既有圖表紀錄進行了比較。

5.4.2 由物理模型研究地下水滲流引起的底切坡體失效(Failure of Undercut Slope due to Groundwater Seepage Studied by Physical Models)(K. Fang et al., 2018)

本研究由京都大學K. Fang等人共同發表。利用物理模型進行底切坡度的研究指出，在基礎部分開挖過程中底切坡面的破壞涉及從主動狀態到被動狀態的應力轉變。本研究旨在進一步研究影響底切坡面應力狀態及其轉變的因素，透過離心機模型研究了地下水滲流下的底切坡的穩定性。本研究選擇含水量為10%的砂作為基本材料，在傾斜平面上用低摩擦特氟龍板覆蓋的剛性木框架逐層壓實。在設計位置嵌入一套壓力表和孔隙壓力傳感器，以觀察離心加速和滲流過程中土壓力和孔隙水壓力的變化。此外，通過沿斜坡模型頂部安裝的激光傳感器監測斜坡運動。通過在入口閘的遙控器上在土壤室側設置水箱來供應滲水，研究滲流壓力和地下水流量對邊坡模型臨界咬邊寬度的影響。實驗結果證實，滲流越高，底切寬度越，並可發現由於滲水導致的不穩定導致這種情況發生。

5.4.3 考慮地震變形的Tawarayama隧道地震破壞研究(Investigation on Seismic Damages of Tawarayama Tunnel Considering Ground Deformation Due to Earthquake)(Xuepeng Zhanga et al., 2018)

本研究由長崎大學Xuepeng Zhanga等人共同發表。本研究指出2016年4月的熊本地震引發了Tawarayama隧道的多次破壞。對這些地震破壞的分佈和特徵進行了調查和總結，以評估潛在的影響因素，雖然一些影響因素尚未得到明確驗證。近年來，學界認為地下結構周圍的地面變形可能是一個關鍵的潛在因素，可以作為揭示地震波傳播方向的指標。關於地面變形，可透過運動結構（SfM）方法檢測地面水平和垂直位移。研究定義與成果如圖6-圖8所示。

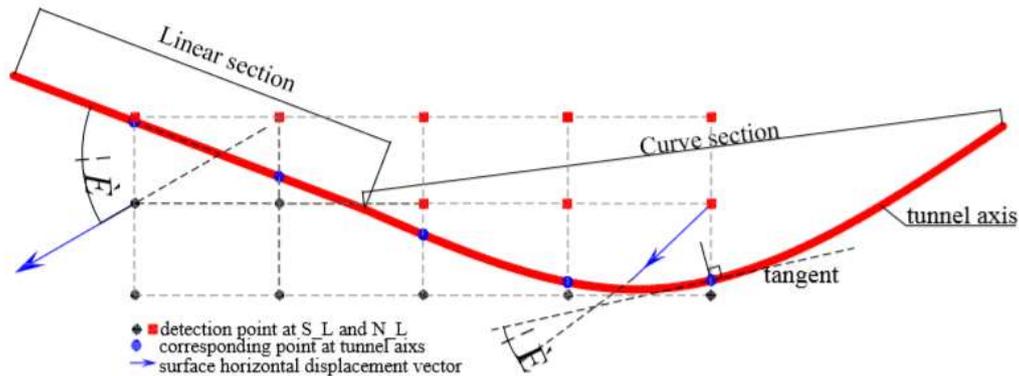


圖6 地面水平運動方向與隧道軸之間角度的定義

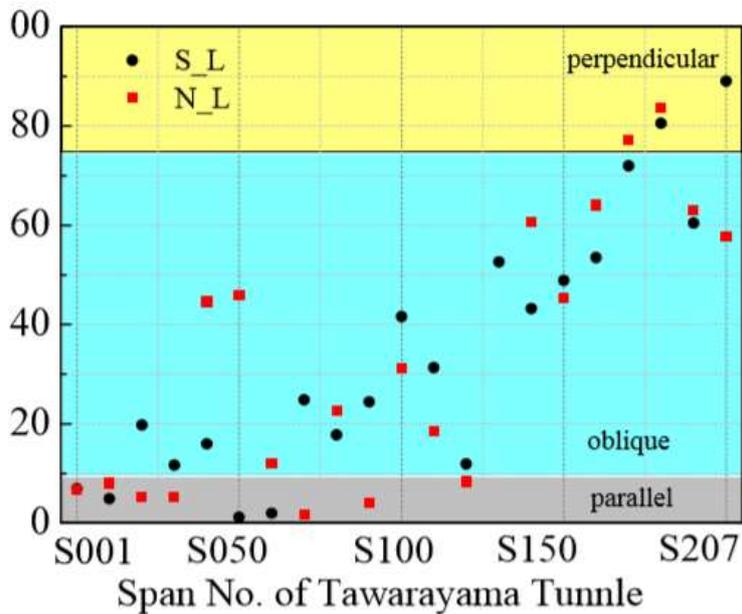


圖7 沿隧道軸的角度 θ 的變化

No.	S119	S120	S121	S122	S123	S124	S125	S126
L								
C								
R								

C: crown L: left side wall R: right side wall

圖8 Tawarayama隧道的環形裂縫分佈 (S119~126) 示意圖 (紅線表示環形裂縫)

5.4.4 對於直接核廢物處置設施建設和運行設計考慮的建議(A Proposal of the Design Consideration in Construction and Operation of Direct Nuclear Waste Disposal Facilities)(Hisashi Hayashia et al., 2018)

本研究由日本Yamaguchi大學的Hisashi Hayashia等人共同發表。本研究指出，在核燃料循環過程中，透過高級核廢料處理再處理的玻璃凝固體，是在日本300m以上深度構建地下處置隧道的最終設計條件，並探討地下設施的設計方法和施工技術。在直接廢棄物處理設施中，考慮到地下處置設施由於施工和運行的可操作性，假設隧道部分變大，而且由於廢核燃料棒的重量大於玻璃凝固體，因此當廢物運輸和運動系統運行時，隧道反轉的動態影響可能更大。因此涉及直接廢物處置設施的動態穩定性、隧道開挖期間、挖掘過程中地面特性的影響以及運輸和運動系統對隧道翻轉的負荷影響。該研究同步應用二維和三維數值分析方法。

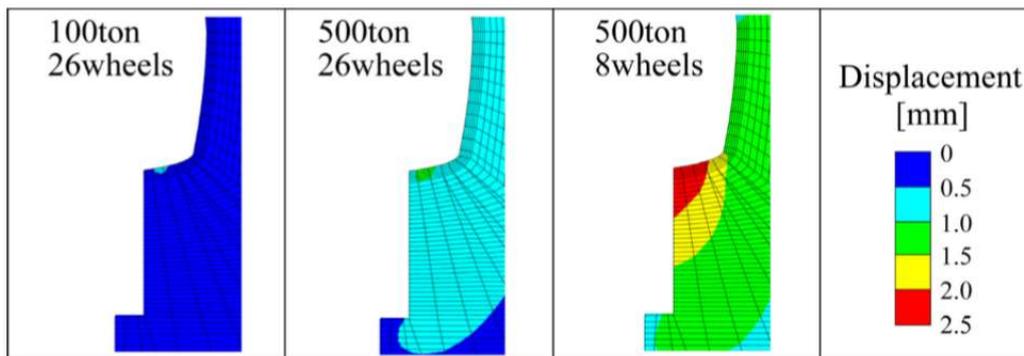


圖9 地面位移(裝載後)

5.4.5 深層硬岩礦山失穩與地震事件的數值模擬(Numerical Simulation of Instability and Seismic Events in Deep Level Hard Rock Mines)(F. Reusch et al.,2018)

本研究由德國F. Reusch等學者共同發表。本研究指出，採礦規劃團隊需接受估算礦山不穩定的評估工具可量化危害性，這些工具必須是定量的、可現場驗證的。在地震活躍的礦場中，這是不太容易的，因為高變形率和動態載荷仍是比較罕見的事件，可靠的動態載荷支撐和加固仿真更加複雜。本研究提出一個數值模型框架，用於在幾個礦場進行岩石力學模擬，以預測誘發地震活動的可能性。

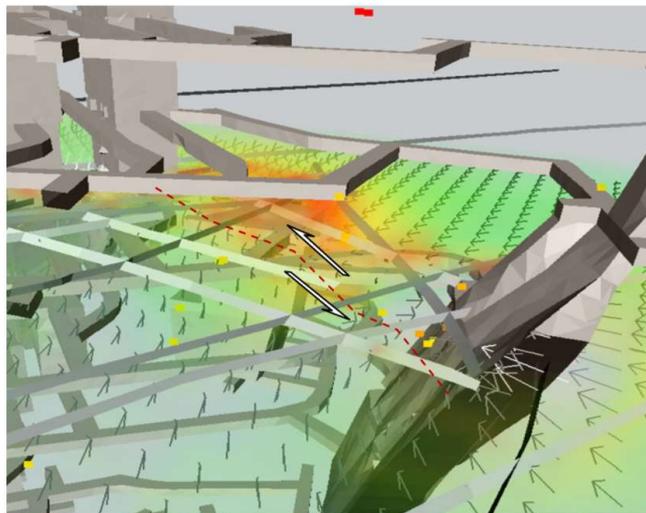


圖10 研究位置模擬主主應力和位移，顯示出主要支柱剪切破裂的潛勢

5.4.6 含夾層岩鹽熱裂解的離散元模擬(Discrete Element Modeling of Thermal Cracking of Rock Salt with Interbedded Layers)(Wenjing Li and Chunhe Yang, 2018)

本研究由中國大陸Wenjing Li及Chunhe Yang共同發表。本研究指出，在氣體注入和抽出的循環過程中，用於儲氣的鹽穴經歷快速的溫度變化，熱效應與邊界條件耦合產生熱應力，從而在地下洞壁引起微裂縫岩鹽。以DEM顆粒流軟體模擬具有夾層的岩鹽，建立一種新混合型的DEM模型，該模型結合了純岩鹽的流變行為和夾層泥岩的脆性特徵，能表示實驗室觀測的宏觀力學岩石特性。結果顯示，高溫降低了抗壓強度，使岩鹽的行為變得更具延展性而不是脆性。由於不均勻的熱傳遞，夾層的存在引起更複雜的微裂紋路徑。而溫度將明顯導致岩鹽強度衰減，誘導熱拉伸裂紋，並在夾層界面周圍形成弱區，可以幫助預測互層鹽穴儲氣庫周圍損傷區的演變。

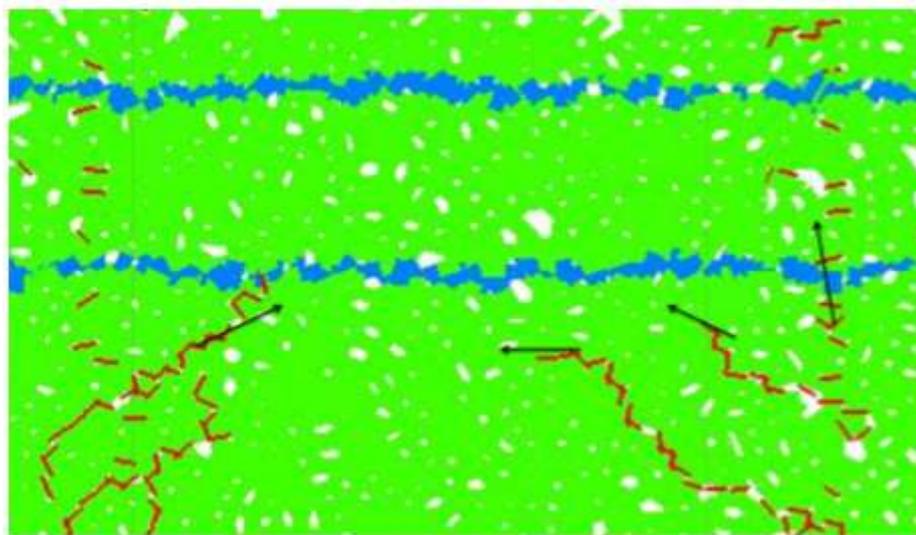


圖11 對於不純鹽岩，在65°C下採用顆粒接觸模式進行熱裂解發展的局部放大（綠線為線性平行鍵合，藍線為平滑接合接觸模式，紅線為熱裂紋，黑色箭頭表示裂紋擴展方向

5.3.7 澳大利亞煤礦鐵礦各向異性和斷塊岩體三維極限平衡邊坡穩定性分析(3D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis for Anisotropic and Faulted Rock Masses in Australian Coal and Iron Ore Mines)(Neil Bar and Alison McQuillan, 2018)

本研究由澳大利亞Neil Bar及Alison McQuillan共同發表。本研究指出，澳大利亞的層狀煤和鐵礦床通常存在於複雜的連接，斷層或折疊，高度各向異性的岩體中。在煤中，這些通常包括中等強度的粉砂岩和含有弱煤層，粉砂岩和頁岩的砂岩。對於鐵礦石，這些鐵礦石包括與非常薄弱的頁岩間隔地夾雜的帶狀鐵層。岩坡破壞機制涉及沿層面滑動，以及作為解壓平面或形成階梯路徑破壞機制的節理面或斷層。多年來，邊坡穩定性建模技術不斷發展，並且隨著模擬軟體的日新月異，而增加了複雜性。本研究介紹露天鐵礦石和煤礦的比較安全係數的案例研究（FoS）從2D和3D極限平衡建模方法獲得。

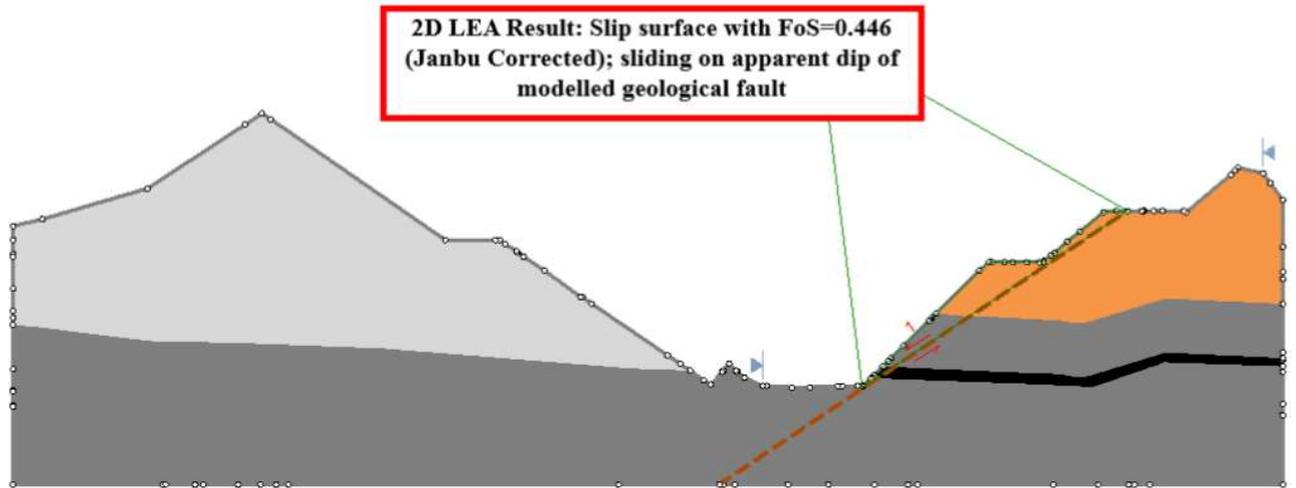


圖12 Slide2018 (2D極限平衡) 臨界滑動面 (Janbu Corrected FoS = 0.446)

5.3.8 熱力耦合作用下岩石PFC建模的初步研究(A Preliminary Study on the PFC Modelling of Rock under Thermal-Mechanical Coupling)(李宏輝等人，2018)

本研究由國防大學理工學院環資系李宏輝副教授、淡江大學土木系楊長義教授、國防大學理工學院博士生陳祺杰與碩士生張嘉偉等人共同發表，如圖13。深層地質處置場是處理核廢料的可行且可靠的方法，深層岩體的力學和熱性質是其長期安全的關鍵因素。岩石的力學性能，包括單軸抗壓強度、張力強度和彈性模數與岩石的溫昇有關。然而，實驗難以觀察熱致裂紋和岩石損傷的微觀機制，因此建立單壓強度試驗和間接張力試驗(巴西人法)的PFC模型，探討由加熱引起的岩石損傷微觀機制。

非均質花崗岩模型包含四種具有不同熱膨脹特性的顆粒類型(石英、鉀長石、斜長石和黑雲母)，透過一系列加熱模擬(溫度增量： $\Delta T = 80-300^{\circ}\text{C}$)顯示，當溫度增量超過 250°C 時發生熱致裂紋，主裂紋類型為拉伸裂紋。在均相PFC模型中，即使在 $\Delta T = 300^{\circ}\text{C}$ 時也不會發生熱致裂紋。在熱 - 力學耦合的模擬中，非均質PFC模型具有以下優點：顯示各種礦物顆粒的半徑膨脹隨溫度升高的差異，導致接觸力的附加和不均勻分佈；不同顆粒之間的應力集中和鍵結斷裂，與導致單軸抗壓強度、彈性模量和初始裂紋應力的降低。



A Preliminary Study on the PFC Modelling of Rock under Thermal-Mechanical Coupling

ARMS 10

P-0183



Hung-Hui Li¹, Zon-Yee Yang², Chi-Jet Chen¹ and Jia-Wei Jhanga¹
¹ National Defense University, Taiwan, ² Tamkang University, Taiwan, Corresponding Author: hunghui@gmail.com



Abstract. Deep geological repositories are a feasible and reliable way to dispose of spent nuclear fuel, and the mechanical and thermal properties of the host rock are key factors in their long-term safety. The mechanical properties of rock, including uniaxial compressive strength, tension strength and elastic modulus are thermally-dependent - for example, the uniaxial compressive strength of rock will decrease with increasing temperature, as a result of thermally-induced cracks between mineral particles. However, thermally-induced cracks and the micro-mechanisms of rock damage are difficult to observe by experiments. We therefore used uniaxial compressive strength test and Brazilian disk PFC models with heterogeneous thermal expansion properties to reveal the micro-mechanisms of rock damage induced by thermal heating. Based on the mineral compositions of granite, heterogeneous models contained four particle types with different thermal expansion properties (quartz, potassium feldspar, plagioclase, and biotite). A series of heating simulations (temperature increment: $\Delta T = 80 - 300$ °C) showed that thermally-induced cracks occurred when the temperature increment exceeded 250 °C, and that the main crack type was tension crack. In homogeneous PFC models no thermally-induced cracking occurred even at $\Delta T = 300$ °C. In simulations of thermal-mechanical coupling, the heterogeneous PFC models have the advantage of revealing differences in radius expansion of various mineral particles with increasing temperature, resulting in the additional and uneven distribution of contact force, stress concentration between different particles and bond breaking, and it lead to decreases in uniaxial compressive strength, elastic modulus and initial crack stress.

Mineral compositions and the mechanical and thermal properties of host rock / Numerical simulations.

Table 1 Mineral volume content, coefficients of thermal expansion and corresponding particle numbers in UCS and Brazilian disk models.

Mineral	Volume content (%)	Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Particle numbers in UCS model	Particle numbers in Brazilian disk model
Quartz	35	24.3	2100	687
Potassium feldspar	45	8.7	2700	883
Plagioclase	15	14.1	900	294
Biotite	5	3.0	300	99
Total			6000	1963

Table 2 Physical and mechanical properties of tested rock.

Input parameters	Unit	Value
Unit weight, ρ	kg/m ³	2600.0
Elasticity, E_e	GPa	51
Ratio of shear to normal stiffness of particle, k_s/k_n		0.208
Coefficient of friction, μ		0.2
Parallel bond radius multiplier, λ		1.0
Parallel bond modulus, E_p	GPa	51
Ratio of parallel bond shear to normal stiffness, k_{sp}/k_{np}		0.208
Parallel bond normal strength, σ_n	MPa	138
Parallel bond shear strength, σ_s	MPa	117.3

Table 3 Microscopic parameters for PFC models.

Items	Unit	Value
Unit weight	kg/m ³	2600
Porosity	%	0.60
Uniaxial compressive strength	MPa	138
Indirect tensile strength	MPa	7
Elastic modulus	GPa	50
Poisson ratio		0.15
Thermal conductivity	W/kg \cdot °C	2.50
Specific heat	J/kg \cdot °C	700
Coefficient of thermal expansion	/°C	10×10^{-6}

Effects of heterogeneity in thermal expansion properties.

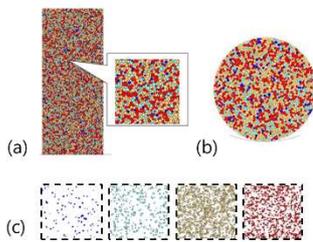


Fig. 1. Heterogeneous PFC models of (a) UCS and (b) Brazilian test. (c) Particle colors are blue: biotite particle (BP), light blue: potassium feldspar particle (PF), yellow: plagioclase particle (PL) and red: quartz particle (QP).

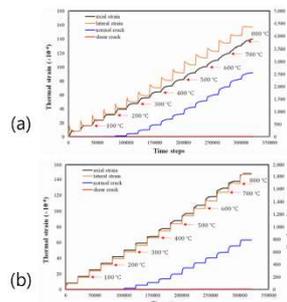


Fig. 2. Simulated thermal strain vs time steps at temperature increments of $\Delta T = 50$ °C for (a) UCS test model and (b) Brazilian test model.

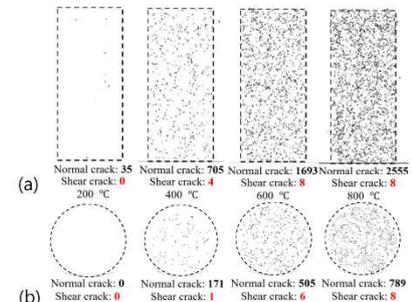


Fig. 3. Development of thermally-induced cracks in the heterogeneous models ($\Delta T = 50-300$ °C): (a) UCS test model and (b) Brazilian test model.

Thermal-mechanical coupling using UCS test models.

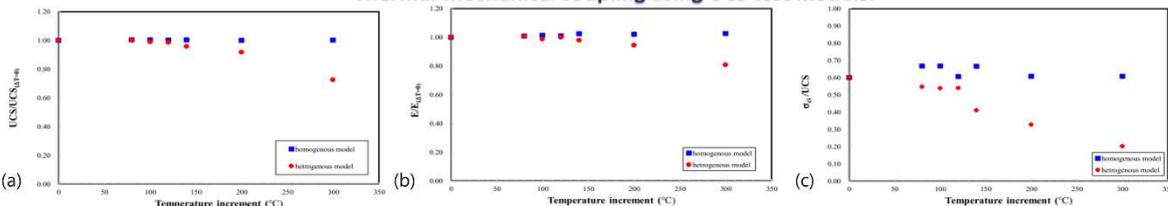


Fig. 4. Simulation results for temperature increment vs (a) $UCS/UCS_{\Delta T=0}$, (b) $E/E_{\Delta T=0}$ and (c) σ_c/UCS



10th Asian Rock Mechanics Symposium

29 October to 03 November 2018, Singapore

圖13 發表海報「熱力耦合作用下岩石PFC建模的初步研究」(A Preliminary Study on the PFC Modelling of Rock under Thermal-Mechanical Coupling)

六、心得與建議

本屆亞洲岩石力學研討會收錄的論文篇數達246篇，研討會主題旨在討論「基礎設施和資源開發中的岩石力學」，包括了核廢料深層處置及礦場安全評估等議題，另外，對於邊坡災害及地震引致大地工程災害等課題亦持續關注。茲將本屆岩石力學研討會的參與心得與建議綜整如下列幾點：

6.1 心得

(1) 岩體溫度上升對岩體強度的影響

本次會議中，有多篇研究著重於探討溫度對岩石力學的影響，其成果對核廢料處置的安全性影響甚鉅。目前國外放射性廢棄物處置方式，均利用地下深開挖作為深層處置策略，然而岩體受高溫作用時，因岩體由不同晶體大小之礦物所組成，當溫度改變將造成之不一樣的熱效應，使岩體產生許多的微裂隙，對於深層岩體各種力學性質與水文性質產生影響，也降低了儲放的安全性。有關熱-力耦合的研究，自1982年起即有學者(Wai et al.)開始進行探討，隨著時程的演進，目前已發展至熱-力-水-化學耦合(Hide Yasuhara, 2018)，探討的參數與範圍也更加擴大與完整。目前先進國家不論在國防或民生上，對於核能的依賴仍舊居高不下，為避免核廢料處置不當造成嚴重環境污染，對於深層處置場的建置與穩定，仍然投入大量的人力與財力進行研究。我國亦有放射性廢棄物處置問題，應持續追蹤此議題之發展。

(2) 岩石動態力學領域的持續發展

近二十年來已有相當多的岩石力學研究學者持續投入岩石動力學領域的研究，尤以中國大陸及其海外學者最為顯著，與之有關的工程應用包括了岩石爆破(岩石邊坡危岩處理、隧道開炸及採礦作業等)與岩體內部之應力波傳遞(地震波或爆震波在岩體中的波傳行為)。除了上述民生工業與地震工程的探討應用外，在軍事上，位處天然掩體之軍事單元在地表受炸彈攻擊時，掩體的反應及震波對軍事單元的影響亦是岩石動力學所延伸應用的課題。

6.2 建議

- (1) 我國現今處理放射性廢棄物策略，採長期隔離人類生活圈之作法，並積極推動相關作業中，對於處置坑道之場址特性、工程設計、結構穩定性、長期安全以及生物圈劑量評估，規劃透過國際資訊研析、審查要項研究、驗證方法評估等步驟推動。為使國內處置管制技術能與國際接軌，建議可引援各國先進實驗成果或數值模擬技術供作參考基礎，發展適合我國處置措施與各項作法。
- (2) 能獲得此次出席國際會議之機會，除感謝科技部核予經費支援外，亦感謝本人所屬國防大學理工學院各級長官在行政程序上給予的協助與指導。透過此次國際學術研討會的參與，除能掌握國際間在岩石力學相關課題的研究發展外，亦能將最新的資訊於課堂時傳遞，收獲良多，建議未來在教師參與國際學術交流事務方面，能持續給予行政與經費上的支持。

七、致謝

承蒙科技部提供參與2018年ISRM國際研討會的經費補助，藉此深表感謝。
(計畫編號：OST107-2626-M-606-001)