

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 砂岩受壓破裂之能量釋放研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 95-2116-M-002-018-  
執行期間：95年08月01日至96年07月31日  
執行單位：國立臺灣大學地質科學系暨研究所

計畫主持人：盧佳遇  
共同主持人：鄭富書、林銘郎  
計畫參與人員：學士級-專任助理：梁毓純

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96 年 07 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

砂岩受壓破裂之能量釋放研究

Energy release during fracturing of sandstone under compression

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2116-M-002-018

執行期間：95 年 8 月 1 日至 96 年 7 月 31 日

計畫主持人：盧佳遇

共同主持人：鄭富書，林銘郎

計畫參與人員：

胡植慶，陳正旺，吳方義，梁毓純，王釋賢

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：

中 華 民 國 96 年 7 月 31 日

## 一、摘要

### 中文摘要

逆斷層錯移往往會造成嚴重的災害，如 921 集集大地震之車籠埔斷層錯移即造成台灣中部慘重災情。為了更了解斷層圍岩之能量累積型態及集中帶，本研究透過岩石完整應力-應變曲線實驗結果，探討岩石後壓破裂後，其能量釋放型態之特性。

另一方面，在真實地層中，應該考慮地下水對於岩石試體之影響，但由於岩石內部孔隙並不是完全連通，因此在室內試驗中，飽和岩石試體之製作不易，故一般室內實驗大多是以氣乾亦或者是烘乾之試體進行實驗，以求得岩石材料之力學特性。因此本研究亦將針對三軸飽和實驗技術進行改善，並建立一套完整的飽和試體準備方法與步驟，並透過純剪應力路徑試驗之施作，探討岩石材料遇水弱化之特性。

關鍵詞：完整應力-應變曲線、飽和試體、三軸試驗

### 英文摘要

The thrust fault slip by earthquake usually caused great damage. For instance, the Chi-Chi earthquake caused serious damage in the middle part of Taiwan. In this research, the post-peak behavior of rock materials will be obtained to express the energy release during fracturing of rock under compression.

Meanwhile, the preparative procedure of saturate specimen will be established. A set of hydrostatic and triaxial tests has been performed through pure shear stress path loading to study the influence of saturation on rock material.

Keyword：post-peak curve, saturated specimen, triaxial test.

## 二、前言

臺灣地區地震之發生主要原因為板塊隱沒帶斷層所導致之深層地震以及前陸逆衝帶斷層錯動所引致之淺源地震，其中，逆衝帶斷層錯動之震源較淺，約 5~10 公里，且距離都會區較近，此類地震發生往往會導致較為重大之災害，如民國八十八年九月二十一日所發生之規模七點三之地震(集集地震)，即造成臺灣地區生命與財產之重大損失。逆斷層之錯移，主要係由於斷層圍岩之能量隨時間累積到其極限狀態時，釋放能量所致。目前對於岩石能量釋放之研究，一般大多係以求得岩石受壓之完整應力-應變曲線為主，但以往受限於試驗機勁度不足，或伺服控制的回饋訊號選擇不當而無法得到。

此外，在真實地層中，應該考慮地下水對於岩石試體之影響，但由於岩石內部孔隙並不是完全連通，因此在室內試驗中，飽和岩石試體之製作不易，故一般室內實驗大多是以氣乾亦或者是烘乾之試體進行實驗，以求得岩石材料之力學特性，但所求得之應力-應變行為並完全不能反應現地真實之情況。

本研究藉由完整應力-應變曲線之求得，可進一步探討岩石破裂能量釋放之特性。另外，透過三軸飽和實驗技術之改善，並進行三軸純剪應力路徑試驗，進而了解砂岩遇水弱化之特性。

## 三、研究內容與方法

本研究係以木山層砂岩此等較為均質之試體為主，在不同控制條件下，量測岩石完整應力-應變曲線，探討岩石材料力學行為之差異，並了解不同控制條件下之破裂型態。此外，本研究亦積極改善現有之三軸實驗技術，以期能夠在使試體接近飽和之情況下，進行三軸實驗，以便更能真實反應地底岩層之力學行為。

依據研究流程內容，可將整體之研究分為以下項目：

1. 文獻資料蒐集與分析
2. 飽和實驗技術之改良
3. 岩石力學行為研究
4. 岩石破裂型態之分析

在下節中便針對本年度研究計畫之執行進度進行說明。

## 四、執行進度

本研究之執行進度說明如下：

### 4.1 文獻資料蒐集與分析

本研究計畫首先將蒐集及整理相關文獻資料及研究報告，以利後續研究之進行。資料蒐集之對象及方向主要包括國內外對於岩石之完整應力-應變曲線之實驗結果、飽和試體之準備方式及岩石能量釋放特性等相關研究，藉由資料蒐集與分析，有助於進一步了解本研究課題之相關研究成果，並可作為日後結果分析與討論之參考。

### 4.2 飽和實驗技術之改良

本研究預針對三軸飽和實驗技術進行改良，以便能夠使試體盡量接近飽和狀態。其研究方法乃是以藉由 GCTS 三軸加壓系統，於三軸室底部施加不同程度之反水壓，討論試體飽和度之變化，並釐清岩石試體之最佳飽和度，以及在最佳飽和度狀態時，所需施加反水壓之門檻值，以做為後續相關實驗之參考。

### 4.3 岩石力學行為研究

本研究主要係以木山層砂岩為主要研究對象，進行一系列之力學試驗，其中力學實驗包含單軸以及三軸壓縮試驗，於單壓實驗過程中量取岩石完整應力-應變曲線，探討岩石峰後之破裂型態；並由飽和三軸實驗之結果，比較乾燥試體及含水試體其強度及變形特性之差異，探討岩石之遇水弱化現，藉此釐清圍壓與水對於岩石材料之影響。

### 4.4 岩石破裂型態分析

藉由完整應力-應變曲線之量測，可以獲得岩石尖峰強度後之應力-應變關係，依據此實驗結果便可更深入了解不同岩石於尖峰強度後之破裂型態。

## 五、研究成果

### 5.1 飽和實驗技術之改良

本研究之試體包含乾燥及含水狀態兩種，在此所謂含水狀態為使試體吸滿水之狀態，其準備方式說明如下：

首先需建立浸水時間對飽和度之關係，為加速浸水飽和速度，因此配合真空抽氣設備進行實驗。將試體浸於真空抽氣皿內，再抽氣形成負壓，加速試體之浸水飽和，其測

試結果如表 1 及圖 1 所示。由圖 1 結果顯示，在浸泡超過 12 小時後，含水量變化幅度極小，可視為接近飽和狀態，因此飽和試體的準備方式為將試體浸水抽氣 24 小時後，視為達到飽和狀態。

在含水試體三軸試驗施作方面，當試體安置於三軸室後，給予 1MPa 之反水壓，以便讓試體之含水狀態穩定。試驗開始後，由孔隙水壓量測子回饋控制孔隙水壓增壓器，以保持試體內之孔隙水壓，使其無孔隙水壓激發現象。

## 5.2 岩石力學行為研究結果

### 5.2.1 乾燥與飽和試體之比較

將試體在乾燥及含水試體狀態下，在不同體積應力下進行純剪試驗所求得之剪力強度，分別繪於三維應力子午空間，如圖 2 所示。

由圖 2 可知，無論是乾燥或含水狀態時，兩者強度破壞包絡線皆呈現良好之線性關係，因此採用 Drucker - Prager 破壞準則可合理描述砂岩之破壞包絡線。由圖 2 可得乾燥及含水狀態下砂岩材料之  $\alpha$ 、 $k$  及  $c$ 、 $\phi$  值，其結果整理如表 2。

由圖 2 可明顯看出含水狀態之試體，在強度上明顯有弱化之情形，在此定義弱化比  $R$  為含水試體剪力強度對乾燥試體剪應力強度之比值，在各圍壓下其  $R$  值如圖 3 所示，砂岩之弱化比約在 0.85 ~ 0.90 間，不同圍壓之弱化程度相近。

由圖 4 結果顯示，含水試體仍為凹向體積應力軸之曲線，與乾燥試體之應變發展趨勢相似；而就變形量而言，可發現含水試體之變形量明顯為大，與體積應力成正相關。

圖 5 及圖 6 顯示在體積應力為 20、40 及 60MPa 時，試體受剪應力作用所產生的體積應變及剪應變發展之情形。

由圖 5 結果顯示，含水試體和乾燥試體仍為相似之趨勢，即剪應力與剪應變在初始時均有相當明顯之線性行為，直到接近破壞強度時，才有大量的降伏現象，且在低剪應力作用下，亦有不可恢復之剪應變產生；在剪應變發展上，在相同剪應力時，仍是含水試體大於乾燥試體。

由圖 6 結果顯示，含水試體之體積應變發展與乾燥試體有相似之趨勢，在低剪應力為受剪壓縮，達剪脹門檻後轉為膨脹，接近破壞強度時有大量降伏之情形，且在初始受剪時，已有不可恢復之體積變形發生；觀察其變形量在低剪應力剪縮或高剪應力剪脹時，相同剪應力下含水試體之變形量均大於乾燥試體。

在含水狀態時，使得試體剪應力強度產生弱化後，在相同之剪應力增加速度下，含水試體會較乾燥試體先達到剪脹門檻值，且其由剪脹門檻值到破壞強度之範圍較乾燥試體為小，即剪脹到破壞的發展速度會較乾燥試體快。

### 5.2.2 完整應力-應變曲線特性

本節主要針對岩石於單壓下，所得到之完整應力-應變曲線，以便了解岩石受壓破裂後其能量釋放特性。此外，為了進一步探討不同種類岩石其能量釋放之特性，本研究除了以木山層砂岩進行實驗外，亦取得車籠埔斷層周圍岩石(取自台灣車籠埔鑽井計畫，TCDP)進行實驗。

由於單壓試驗在試體達到尖峰強度時後可能發生不可控制之脆性破壞，因此主控加壓之環向應變速率需小至可控制範圍，經由文獻資料整理及實驗測試結果，本研究採用

環向應變速率為  $10^{-6}/\text{sec}$ 。由實驗過程可知，欲獲得一組完整應力-應變曲線需耗時 15~20 小時。

由圖 7 顯示，木山層砂岩之完整應力-應變曲線具有幾個明顯階段，其與 Goodman(1989)所描述之特徵大致符合，在尖峰強度前可分為孔隙閉合、線彈性、裂縫穩定延伸及裂縫不穩定延伸四個階段。

首先第一階段為孔隙閉合階段，岩石開始受壓，由於內部之裂隙閉合，呈現一凹向上斜率漸增之應力-應變曲線，顯示岩石之變形模數逐漸增大；第二階段時裂隙已閉合，無新裂隙產生，材料之變形模數及包松比皆為定值；第三階段為裂縫穩定延伸，通常從岩石試體之中央部分位置微裂隙開始延伸，或產生新的裂隙，其延伸方向大致與主軸應力方向平行，在圍壓束制下，這些裂隙發展至一定長度後即停止；最後為不穩定延伸階段，此時材料內之裂隙大幅增加，並往兩端發展。

圖 8 為車籠埔斷層圍岩進行實驗所得到之結果，其岩性屬於粉砂岩段，在陳正旺(2005)研究中指出，此類岩石之孔隙率低，且變形性小，單壓強度依據 ISRM(1981)之建議，屬於中強度岩石 (medium rock)。

由圖 8 結果顯示，由於粉砂岩孔隙率較低，因此在加壓後，並無明顯之孔隙閉合階段，且應變量較小；其餘各階段與木山層砂岩大致相同。

### 5.2.3 岩石破裂型態之分析

由圖 7 及圖 8 結果顯示，本研究所採用之岩石可歸類為第一類岩石，此第一類岩石之裂縫發展是穩定的，在達到尖峰強度後仍須對試體作功，以使其足以維持裂縫的成長。

## 六、 結論

由本研究所進行之飽和三軸試驗及單壓完整應力-應變曲線實驗結果可得到以下結論：

### 6.1 飽和三軸試驗

#### 6.1.1 強度方面

乾燥及含水試體強度破壞包絡線，選用 Drucker-Prager 破壞準則可合理描述；且含水試體強度為乾燥試體之 88%，其隨圍壓增加並無太大之差異。

#### 6.1.2 變形方面

無論乾燥或含水試體，在體積應力階段時皆有隨體積應力增加而體積模數  $K$  亦隨增加之趨勢，且含水試體之壓縮量較乾燥試體為大，軟化現象較前人明顯，可得知在遇水軟化現象上，基質含量多寡與軟化程度嚴重程度為正相關。

在剪應力對體積應變階段，乾燥及含水試體之整體剪脹門檻均在  $\eta = 0.4$  處；而潛變階段時，試體由潛縮轉為潛脹之潛脹門檻，乾燥試體約在  $\eta = 0.5 \sim 0.6$  間發生，含水試體約在  $\eta = 0.6 \sim 0.7$  發生，顯示原本可用來預警破壞發生行為之潛脹門檻值，在遇水後顯得更危險，即經潛脹門檻後至破壞時，可反應之時間更短。

在剪應力對剪應變階段，乾燥及含水試體均在初始時呈現良好之線性關係，即剪力模數  $G$  在低剪應力時可視為定值，且相同體積應力下，以含水試體之  $G$  值較小，而兩狀態均有隨體積應力上升， $G$  值隨之增加之趨勢；至接近破壞強度時，始有大量剪應變

產生。

## 6.2 完整應力-應變曲線

本研究所用之砂岩，依據實驗結果顯示，均屬於第一類岩石，代表此類岩石受壓破裂後，其裂縫發展是屬於穩定，且在尖峰強度後，需持續對試體做功，才能維持裂縫的成長，此現象亦顯示其能量釋放是屬於穩定型。

## 七、參考文獻

- [1] 李怡德 (1996)，軟弱砂岩弱化行為研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [2] 徐力平 (1996)，高現地應力下地下開挖之岩爆研究，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
- [3] 蔡立盛(2005)，砂岩依時性力學特性之研究與應用，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
- [4] 陳正旺 (2005)，車籠埔斷層周圍岩石力學特性之初探，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [5] 張裕沅(2007)，乾/濕軟弱砂岩力學行為之比較，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [6] Goodman, R. E. (1989), Introduction to rock mechanics, John Wiley & Sons.
- [7] Rummel, F. and Fairhurst, C. (1970), "Determination of the post-failure behavior of brittle rock using a servo-controlled testing machine", Rock Mech. 2, 189-204.
- [8] Wawersik, W. R. and Fairhurst, C. (1970), "A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 7, 561-575.
- [9] Wawersik, W. R. and Brace, W. F. (1971), "Post-failure behavior of a granite and diabase", Rock Mech. 3,61-85.
- [10] ISRM (1981), Rock characterization testing and monitoring, ISRM Suggested Methods (Edited by E. T. Brown). Pergamon, New York, 211.

表 1(a) 含水試體重

時間 (hr)	乾燥	1	4	8	24	48	72
試體 1	666.3	722.7	722.7	722.7	723.0	722.8	723.1
試體 2	684.1	736.7	737.5	737.7	737.7	738.3	738.3
試體 3	692.7	743.8	744.2	744.6	744.6	745.0	744.8
試體 4	678.9	734.7	735.3	735.2	735.4	735.5	736.0
試體 5	698.4	747.7	749.3	749.5	749.6	750.2	750.1
試體 6	709.4	753.5	755.1	755.3	755.3	755.9	756.1

表 1(b) 飽和吸水率 (%)

時間	乾燥	1	4	8	24	48	72
----	----	---	---	---	----	----	----

(hr)							
試體 1	0.0	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
試體 2	0.0	7.7	7.8	7.8	7.8	7.9	7.9
試體 3	0.0	7.4	7.4	7.5	7.5	7.6	7.5
試體 4	0.0	8.2	8.3	8.3	8.3	8.3	8.4
試體 5	0.0	7.1	7.3	7.3	7.3	7.4	7.4
試體 6	0.0	6.2	6.5	6.5	6.5	6.6	6.6

表 2 砂岩試驗結果之材料參數

試體狀態	$\alpha$ (MPa)	k	C (MPa)	$\phi$ ( $^{\circ}$ )
乾 燥	0.35	9.71	9.06	44.74
含 水	0.31	9.06	7.99	39.24

註：1.  $\alpha$  及 k 為依 Drucker – Prager 準則線性迴歸所得；

2. c 及  $\phi$  為 Mohr – Coulomb 準則換算求得。

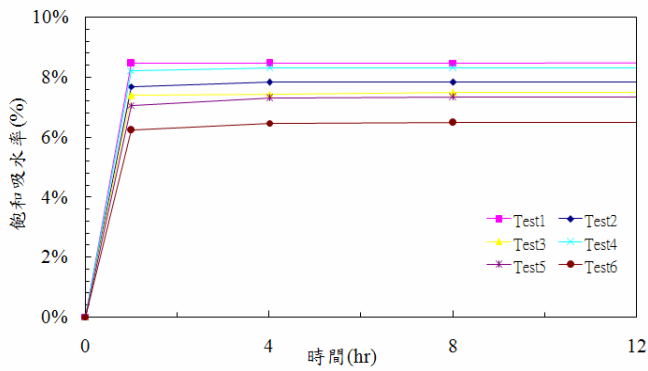


圖 1 浸水時間與飽和吸水率之關係圖

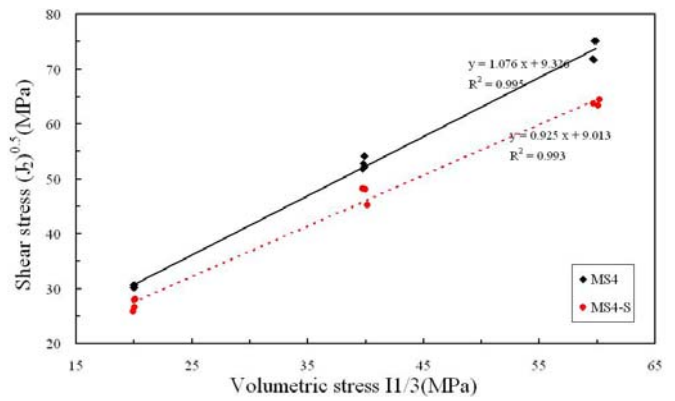


圖 2 岩石試體之破壞包絡線比較圖

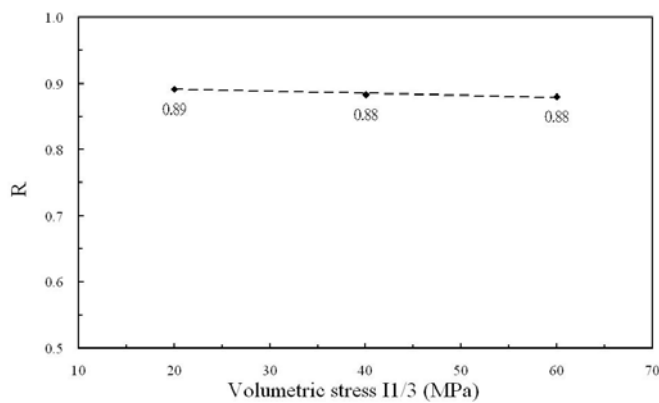


圖 3 各體積應力下之弱化比(R)

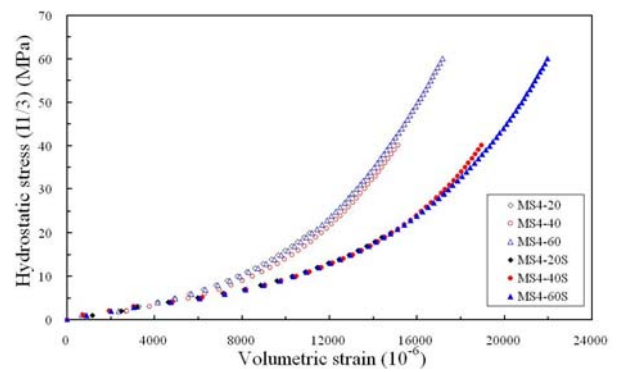


圖 4 試體之體積應力與體積應變關係

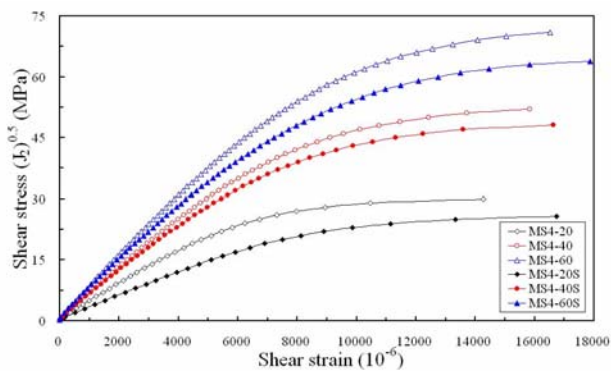


圖 5 試體之剪應力與剪應變關係

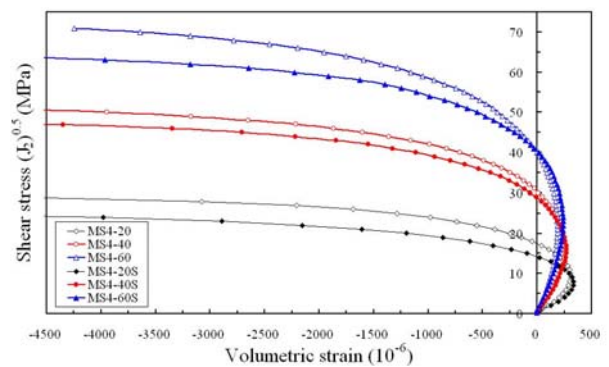


圖 6 試體之剪應力與體積應變關係

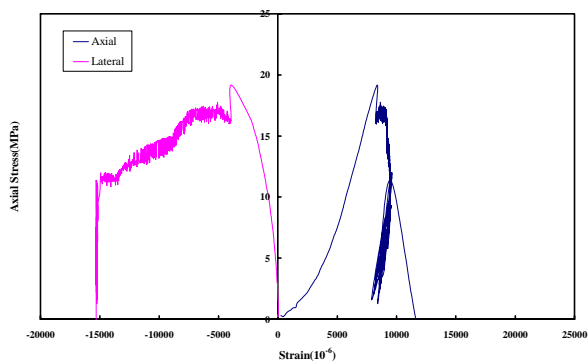


圖 7 木山層之完整應力-應變曲線

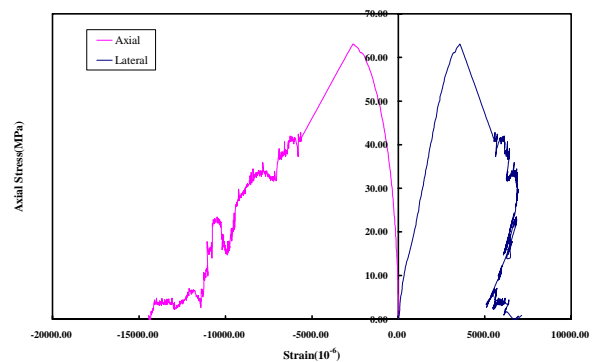


圖 8 粉砂岩之完整應力-應變曲線

## 出席 2007 年歐洲地球科學聯合會 (EGU) 年會報告

報告人：盧佳遇

### 一、參加會議經過

四月十五日由台北搭機至。

四月十七日至四月二十一日於維也納國際會議中心參加大會。

四月二十二日搭機返國。

### 二、與會心得

此次會議蒙國科會支持得以參加會議特此感謝。謹就參加之心得予以報告。

歐洲地球科學聯合會 (EGU) 為國際地質界之重要大會之一。因為此會提供世界各國與會人員交換地質資訊之機會，發展個人及國家交流之層面以及決定將來個人及各個地質學會研究之方向，因此各國之地質人員無不爭先參加此會。籌備單位對於會議細節之籌備可謂無微不至。不僅包括會議主題、程序、主持人；與會人員之食宿、交通；旅遊、觀光、文藝及休閒活動之需求等，還設立地質博覽會以供各界人事參觀。

這次會議之重要主題包括：

- 1) 聯合會研討 (Union Symposia)
- 2) 教育研討 (Educational Symposia)
- 3) 大氣科學 (Atmospheric Sciences)。
- 4) 生物地球科學 (Biogeosciences)。
- 5) 氣候：過去，現在與未來 (Climate: Past, Present, Future)

- 6) 寒星科學 (Cryospheric Sciences)。
- 7) 能源資源與環境 (Energy, Resources and the Environment)。
- 8) 地球化學，礦物學，岩石學及火山學 (Geochemistry, Mineralogy, Petrology & Volcanology)。
- 9) 大地測量學 (Geodesy)。
- 10) 地球動力學 (Geodynamics)。
- 11) 地形學 (Geomorphology)。
- 12) 地球科學儀器安裝與資料系統 (Geosciences instrumentation and Data Systems)。
- 13) 水文學 (Hydrological Sciences)。
- 14) 同位素 (Isotopes in Geosciences: Instrumentation and Applications )。
- 15) 地磁，古地磁，岩石物理及地球物質 (Magnetism, Paleomagnetism, Rock physics & Geomaterials)。
- 16) 天然災害 (Natural Hazards)。
- 17) 地球物理中之非線性作用 (Nonlinear Processes in Geophysics)。
- 18) 海洋科學 (Ocean Sciences)。
- 19) 行星與太陽系統科學 (Planetary and Solar System Sciences)。
- 20) 地震學 (Seismology )。
- 21) 土壤系統科學 (Soil System Sciences )。

22) 太陽—地球科學 (Solar-terrestrial Sciences)。

23) 地層學，沈積學與古生物學 (Stratigraphy, sedimentology, and Paleontology)。

24) 大地構造與構造地質學 (Tectonics and Structural Geology)。

會議經過緊密的議程，詳盡、眾多之論文討論，與同行的交流以及製作精美之海報展示後圓滿結束。與會人員大多覺得獲益匪淺。

此次會議中映象最深刻的是體會到衛星科技的進步在學術研究上的影響。幾乎所有星球表面大區域的地質現象如全球變遷，大氣科學，地形學，地體構造，大地測量，甚至地震學均要靠衛星科技的協助研究，才能獲得較客觀的研究成果。因此，國家發展衛星科技是刻不容緩的。

### 三、攜回資料名稱及內容

會議之議程一冊

會議之議程及摘要光碟一片