

## 地工照片說明

# 膠結作用與砂岩之強度 Cementation and Strength of Sandstones

\*洪如江

## 一、引言

影響岩石材質強度的因素很多,例如成岩的時間(年齡)、礦物成份、結晶狀態、膠結作用、風化程度、應力環境、孔隙水、等等。這些因素,未必都是完全獨立的。本文,主要在說明膠結作用對砂岩強度的影響。用來觀察膠結作用的工具是一套良好的偏光顯微鏡。至於岩石樣品方面,有兩個來源。坪林隧道工程相關的砂岩岩心或岩塊中,可以觀察到多種膠結作用,但很少看到「同軸外長」(syntaxial overgrowth)一類的膠結。正好大陸張家界砂岩中,富有「同軸外長」現象。因此,選出最富代表性的顯微照片20張,供大家參考。

鑑於本刊讀者大多為土木工程師,因此也對可能在偏光顯微鏡下看到的膠結現象,略加介紹。

## 二、膠結作用與砂岩之強度

砂岩之膠結材料,主要有下列四種:

- (1).氧化鐵
- (2).粘土礦物
- (3).方解石
- (4).石英

黏土礦物的顆粒本來就已經夠小的了,要用電子顯微鏡才能看到其粒形;但是氧化鐵的顆粒更小,足以作為黏土顆粒的膠結物。根據林子平(民國74年)之研究,南港砂岩岩心之縱波速度,新鮮者僅達1572m/sec至2134 m/sec;而風化者高達2409m/sec,係因其黏土礦物顆粒間之孔隙多由氧化鐵所充填並發揮某種程度之膠結作用。氧化鐵當然也可以充作其他礦物顆粒間的膠結材料。

至於黏土礦物在一塊岩石材料中能發揮多大的膠結作用?要看黏土礦物的種類、產狀、所佔比例、含水狀況等等因素而定。黏土礦物的種類,必須應用電子顯微鏡或X-光繞射儀加以鑑定,本文不作進一步討論。至於產狀方面,究竟岩石材料中的粘土礦物,是與其所膠結的骨材一起沉積的?或是由岩石材質中的弱礦物(指易於風化的礦物)風化而成的?其作用不盡相同。而含水狀況的影響,因黏土礦物的種類而大有不同。至於黏土礦物在一塊岩石中所佔的比例,影響很大。根據筆者等之研究(洪如江等9人,民國67年),黏土若在整個複合土(例如黏土與砂之複合或黏土與礫石之複合)中佔25%左右以上之比例,則複合土中之骨材(砂或礫石)完全被黏土所隔開而無法接觸在一起,在這種情況之下,複合材料的強度,全由黏土決定,粘土也就不再能算是砂或礫的膠結

材料。上述複合材料成岩之後，黏土隔開骨材所需的比例可能更低(15%?)，依構成岩石材料各成分的特性而定。若黏土比例太高，或骨材表面塗佈太厚的粘土礦物，將會妨礙到骨材，尤其是石英粒或方解石粒，的「同軸外長」(syntaxial overgrowths)。

在坪林隧道工程C-52號鑽孔5.5m深所採取之大桶山細砂岩，其膠結材料大部份為黏土質者。其在偏光顯微鏡下所拍攝之照片，示於照片一及照片二。岩心之壓力強度為56MPa。

在坪林隧道工程C-4號鑽孔70m深所採取之木山層砂岩岩心(壓力強度48MPa)，也是黏土礦物膠結之另一例子。見照片三及照片四。

方解石，本身可以是被膠結的原生顆粒，也可以是沉澱在岩石(骨材間)孔隙中的膠結材料。方解石礦物顆粒，由於富有解理(cleavage)，因此，由方解石為骨幹所形成的岩石，強度很少高於100MPa。由方解石作為膠結材料的某些石灰質砂岩，若是形成優良級配之組織，其強度可以較高。在坪林隧道工程C-4鑽孔85m深所採取之木山層鈣層砂岩(壓力強度為85.4MPa)，為方解石膠結之一例。

一般而言，石英是非常堅強的膠結材料，但其堅強之程度，也因其產狀而有相當大的不同，茲以砂岩與石英岩為例，說明於下。

砂岩的骨架，主要係由石英顆粒(稱為「原生石英顆粒」，primary quartz grains或original detrital grains)構成。原生石英顆粒，常見圓形或偏圓形者。在成岩之初，假設砂岩孔隙中尚少充填物，而各石英顆粒之間多呈點接觸。流動

之水帶來矽質( $\text{SiO}_2$ )分子，附著於原生石英顆粒之表面(常常已經先附著一極薄之雜質塗料，稱為塵面或「塵線(dust line)而成為「次生石英」(secondary quartz或authigenic quartz)。原生石英顆粒表面上之次生石英，以原生石英顆粒之球心為中心，逐漸向外成長、加厚，終於充填了所有(或幾乎全部)的孔隙而成為一種相當堅強的膠結材料，是為同軸外長。次生石英，在偏光顯微鏡下看起來的干涉色，與原生石英顆粒者相同，因此可判斷其同軸外長之時，完全順從原生石英顆粒的光學特性而結晶出來。但是，次生石英與原生石英還是有可以分辨出來的地方。第一，原生石英顆粒之中，常含有許多瑕疵(結晶上的瑕疵、水泡、或刮痕等等)；而次生石英中則少瑕疵。第二，原生石英顆粒與次生石英之間，常有一塵線(dust line)相隔。第三，原生石英顆粒之形狀常偏於圓形；而同軸外長後之石英顆粒(以原生石英為核而以次生石英為殼)常呈多邊形。筆者找了多年，才在張家界脆性砂岩(單壓強度為260MPa)的光學薄片中找到非常標準的「同軸外長」(syntaxial overgrowth)影像(照片七至照片十)。為了加強視覺效果，筆者在偏光顯微鏡取像之時，加了一個 $\lambda$ 的濾片(compensator)，使顏色較濃，各顆粒之間、塵線、瑕疵等等，也更容易分辨出來。

砂岩之孔隙全部由次生石充填之後，砂岩終於形成一種完全緊密膠結且互鎖之顯微結構，有人認為已經成為一種石英岩(quartzite)顯微結構。但筆者認為：既然石英岩被定義為一種變質岩，其形成應以「壓力溶接」(pressure solution，簡稱壓溶)為主。

筆者認為廣義之膠結，應包括壓溶。在壓溶充分發育之砂岩或石英岩，在顯微鏡可明辨之二度空間的範圍內，各石英顆間，常呈直線接觸（straight contact）、凹凸接觸（cavoconvex contact）、與溶合接觸（suture contact）。在這三種壓溶接觸之中，直線接觸之壓溶程度最低，溶合接觸之程度最高。壓溶發展到極端，可能把部份石英壓離石英顆粒之接觸帶，而釋放至孔隙中，或經過一種鋸齒外觀之「溶接線」（stylolite，有譯溶合線者）而逸至石英顆粒間之孔隙中而成為膠結材料，甚至有在最小壓力方向形成石英岩脈者。在顯微鏡範圍中之溶接線，稱為顯微溶接線（microstylolite）。溶接線不只出現於石英岩或砂岩中，也常出現在大理岩、石灰岩或白雲岩中。含同軸外長及次生石英之砂岩，當然也有可能進一步發展出壓溶現象；甚至，某些砂岩，在發育同軸外長之初，就已經出現少數程度較低之壓溶，例如直線接觸者。

台灣北部的坪林隧道，必然穿過四稜砂岩。四稜砂岩，因曾受大地應力之作用而高度破裂，但其材質相當強硬，且曾受輕度變質作用，故有稱之為石英岩者。在 PH-29 號鑽孔 29.5m 深所採取岩心（壓力強度為 130MPa），其石英顆粒接觸緊密，部份弱礦物已風化（照片十一及照片十二）。自 PH-29 號鑽孔 178.5m 所採取之細粒四稜砂岩（壓力強度 166MPa），其顯微照片（照片十三及照片十四）顯示：石英顆粒排列緊密，孔隙中之岩屑亦多為石英質者。

當坪林隧道導坑在向前開挖之時，曾取得一塊較新鮮之四稜砂岩（PL-1），製備出一光學薄片，用偏光顯微鏡加以觀

察，發現不但其石英顆粒排列緊密至發生壓溶，甚至還有文象（graphic texture）、多晶質石英顆粒（polycrystalline quartz grain）、波狀消光（undulatory extinction）等等現象。

所謂文象，通常指花崗岩在當初冷卻結晶之時，恰巧在某一溫度，有兩種礦物（通常是石英與長石）同步結晶，在一個顆粒之中，有兩種礦物穿插成長（intergrowth），而成一種如畫般的組織。在顯微鏡才能看到的文象，稱為顯微文象（micro-graphic texture）。坪林隧道的四稜砂岩，含有文象顆粒，表示四稜砂岩之組成砂粒之中，有來自花崗岩（產於福建？）者；而且，具文象之花崗質砂粒，石英與長石已穿插結晶在一起，必然遠較兩種礦物分別結晶為兩粒來得強硬多了，見照片十五與照片十六。

所謂多晶質石英顆粒，係指一個石英顆粒由許多微小而 C-軸方向各不相同的石英粒所結合（通常還是壓溶）而成。四稜砂岩中含有這種顆粒，表示其組成砂粒之中，有些是來自石英岩。見照片十七與照片十八。

而石英顆粒之波狀消光，係指用偏光顯微鏡可看到一顆石英含略為不同但明顯可辨的帶狀干涉色，而這些干涉色帶，在轉動偏光顯微鏡度盤（2至3度）時，就會有波浪狀的（消光）變化。這種現象，表示岩石在成岩之後曾因受到相當程度的大地應力（tectonic stress）之作用而產生相當之應變。照片十九，示坪林隧道中所採四稜砂岩之光學薄片在偏光顯微鏡下所看到的波狀消光靜態影像。這種現象，顯示坪林隧道中之四稜砂岩，曾發生相當大的應變。

照片二十之四稜砂岩岩心所含之鋸齒狀「溶接帶」(stylolite)。岩心取自坪林隧道工程鑽孔PH-29之335m深處。由此，更可見坪林隧道之四稜砂岩之材質，壓溶程度已達極端。

照片十五至照片十九之四稜砂岩、與照片二十之四稜砂岩岩心，其壓力強度，依筆者之判斷，可能皆在200MPa以上。

坪林隧道中之四稜砂岩，雖然有不少學者主張已經是石英岩，一種變質岩；但變質度可能還不是很高。因為，其所含的顯微鏡文象顆粒與多晶質石英顆粒，尚且完整，似乎尚未受到顯著的改變。此外，岩石中的正常石英顆粒，也還不見被壓扁或呈順向排列之現象。

誠如本文開始時所談，影響砂岩強度的因素很多，膠結作用是很重要的因素，但不是全部的因素。其他因素的討論，或已不少，或尚待研究，茲就膠結相關的顯微照片十九張及岩心(含溶接線)照片一張，分別加以說明。

### 三、照片說明

#### 照片一及照片二：大桶山細砂岩 C52(5.5m)之顯微照片

二照片中之標尺長度皆為0.32mm。照片一為正交偏光；照片二為平行偏光。由照片可見：石英顆粒排列並不緊密；孔隙中之基質，在平行偏光之照片中，並不潔淨(以石英顆粒之透明，亦即白色，作為潔淨之標準)，判斷主要為長石風化而成之黏土及一些岩石碎屑，構成一種泥質膠結。岩石壓力強度為56MPa。

#### 照片三及照片四：木山層砂岩 C4(70m)之顯微照片

二照片中之標尺長度皆為0.32mm。照片三為正交偏光；照片四為平行偏光。由於長石所佔比例甚高，且長石多已風化成黏土而成為一種泥質膠結。岩石壓力強度為48MPa。

#### 照片五及照片六：木山層鈣質砂岩 C4(85m)之顯微照片

二照片中之標尺長度皆為0.32mm。照片五為正交偏光；照片六為平行偏光。石英顆粒大多由方解石所隔開，但方解石對石英顆粒之膠結完全，岩石之壓力強度為85.4MPa，大部分反應方解石之強度，部分反應石英顆粒之作用。

#### 照片七及照片八：張家界砂岩之顯微照片，位置一

二照片中之標尺長度皆為0.16mm。照片七為正交偏光；照片八為平行偏光。照片七，中央一個灰白色的石英顆粒，其內核為原生石英顆粒，含有不少顯微瑕疵；其較薄之外殼為同軸外長之次生石英，極少顯微瑕疵。原生石英顆粒與次生石英之間的塵線，也明顯可見。照片八(平行偏光)之原生石英顆粒與次生石英膠結材料，皆呈透明之白色，塵線也明顯可見。岩石壓力強度為260MPa。

#### 照片九及照片十：張家界砂岩之顯微照片，位置二

與照片七、八同一張光學薄片中的另一位置，可以看同多個同軸外長之石英顆粒。解釋同照片七及照片八。

### 照片十一及照片十二：四稜砂岩 PH-29 (29.5m) 之顯微照片

二照片中之標尺長度皆為 0.32mm。照片十一為正交偏光；照片十二者為平行偏光。石英顆粒接觸緊密；但部份弱礦物已風化，此由照片十二中的不透光（非石英）面積可以看出。主要為壓溶式膠結。岩石壓力強度為 130MPa。

### 照片十三及照片十四：細粒四稜砂岩 PH-29 (178.5m) 之顯微照片

二照片中之標尺長度皆為 0.16mm。照片十三為正交偏光；照片十四為平行偏光。石英顆粒排列緊密，孔隙中之較小粒岩屑亦多為石英質者，構成級配良好、膠結亦佳之組織。岩石之壓力強度為 166MPa。

### 照片十五：四稜砂岩 PL-1 顯微照片(一)

照片中之標尺長度為 1.28mm。正交偏光。本岩樣為取自坪林導坑開挖出來之新鮮岩塊。石英顆粒幾乎都互鎖在一起，並多高度壓溶現象。標尺左上角附近可見一具有「顯微文象組織」(micrographic texture)之顆粒，判斷原為花崗岩碎岩(可能源自福建?)。岩石壓力強度，筆者判斷，可能在 200MPa 以上。

### 照片十六：四稜砂岩 PL-1 顯微照片(二)

為照片十五光學薄片之局部放大(標尺長度為 0.64mm)。具文象之顆粒在照片中央位置。石英顆粒之壓溶接觸更容易看清楚。

### 照片十七與照片十八：四稜砂岩 PL-1 之顯微照片(三)與(四)

二照片皆為照片十五之同一光學薄片中的另一位置，並加以放大(標尺長度

0.16mm)。照片十七為正交偏光；照片十八為平行偏光。照片十七中央，一顆多晶質石英顆粒，應是源自石英岩層者，而非在本地岩層中結晶而成。多晶質石英顆粒，由眾多微小石英粒(其 C 軸方向各異)壓溶而成，在進入本岩塊之中，尚能保持為一完整顆粒。在照片十七，尚可見幾顆石英顆粒(大小與多晶質石英顆粒相近)，粒間接觸極緊密，達壓溶狀態。照片十八，在平行偏光之下，整片透明，可見此一照片所拍之位置，已經是一片石英板了。

### 照片十九：四稜砂岩 PL-1 顯微照片(五)

正交偏光但不加石膏濾片(compensator)。標尺長度為 0.64mm。位於照片中央且佔照片大部分面積之石英顆粒，具帶狀干涉色。鎖定此一石英顆粒在顯微鏡視野之內，略為旋轉顯微鏡度盤，此一石英顆粒之帶狀干涉色會起波浪狀的消光變化，稱波狀消光(undulatory extinction)或雲霧狀消光。此種現象，顯示四稜砂岩會受到相當的大地應力而產生應變。

### 照片二十：四稜砂岩 PH-29(335m) 岩心及溶接線(stylolite)

此一岩心，取自坪林隧道工程鑽孔 PH-29 之 335m 深度，含一溶接線，呈尖銳波浪狀(或稱鋸齒狀)，可見此一岩石會受極高壓力。溶接線之平均方向大致垂直於最大應力方向，壓溶之石英經溶接線而逸至石英顆粒間之孔隙中或逸至最小應力方向之裂隙中(未視於照片中)。但溶接線內之深色物質為一些不溶解之殘渣，反而可能使溶接線之拉力強度低落。

#### 四、誌謝

本文之研究，曾受國科會(科教處)之補助(計畫編號NSC-84-2512-S002-001級NSC-85-2511-S002-002)。偏光顯微鏡(德國蔡司Axioskop Pol)為台大土木工程地質學實驗室所有。砂岩標本之中，大桶山細砂岩、木山層砂岩、四稜砂岩PH-29(29.5m)、與細粒四稜砂岩，皆由徐力平博士取自坪林隧道工程鑽孔中之岩心，而此等岩心之壓力強度試驗也皆由徐力平博士在台大岩石力學實驗室中，利用剛性試驗機試驗。照片七至照片十之張家界砂岩，係筆者訪問大陸長江水利委員會時受贈者，其壓力強度試驗，也是利用台大土木工程岩石力學實驗室中之剛性試驗機所辦理者。光學薄片之製備曾受台大地質系與經濟部中央地質調查所

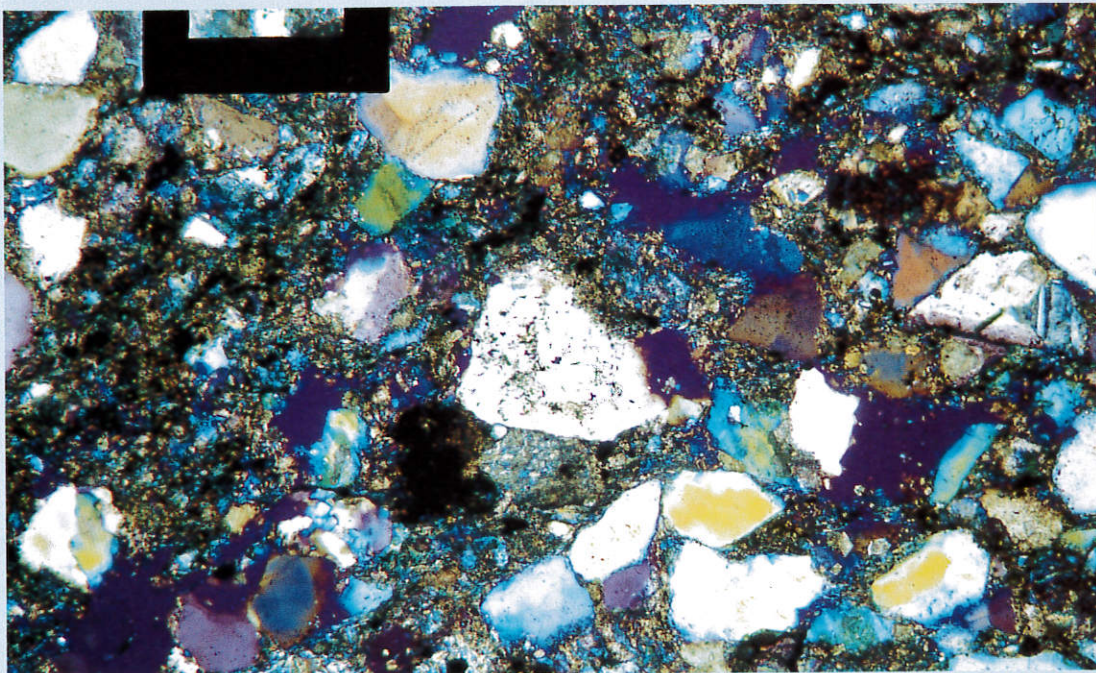
之協助。照片二十之樣品，係由中興工程顧問公司方主任地質師中權先生所採，筆者僅加以拍照留念而已。本文研究期間，多次向方中權先生(中興工程顧問公司)與張郇生先生(經濟部中央地質調查所)請教，獲益不淺。台大土木工程系鄭富書教授支援本人與徐力平博士在岩石力學實驗室與工程地質實驗室中從事試驗工作。凡此，皆一併致謝。

#### 參考文獻

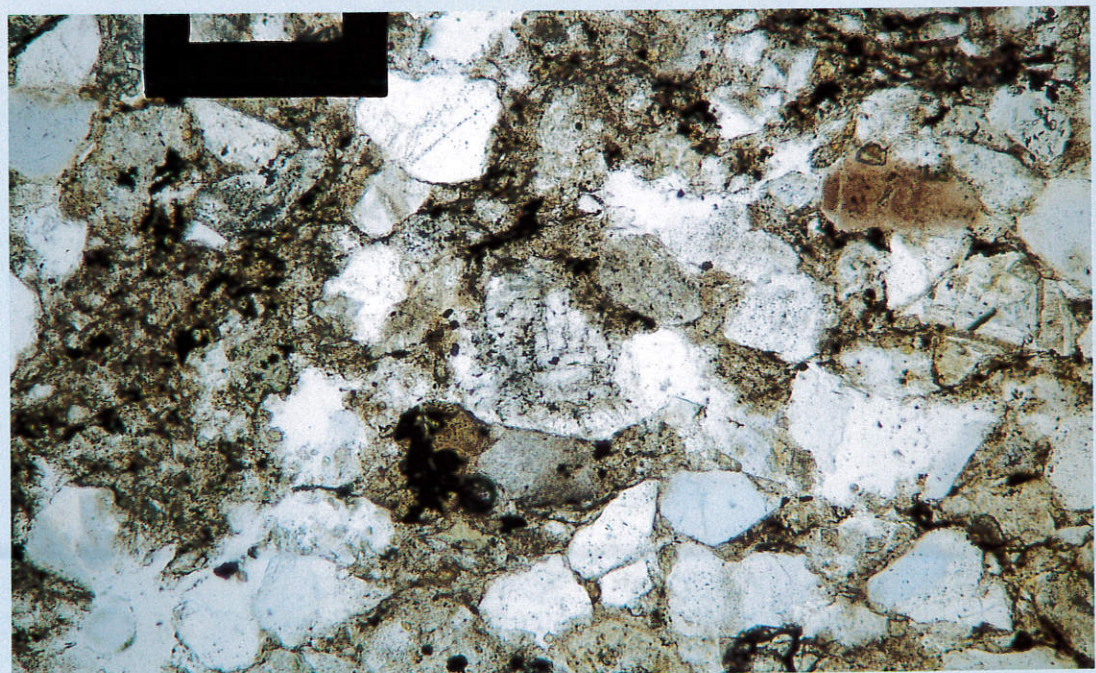
林子平(民國74年)，南港砂岩工程性質之影響因素研究，台大地質學研究所碩士論文。

洪如江等9人(民國67)「複合土工程性質之初步研究」，國立台灣大學工程學刊第23期，1-12頁。



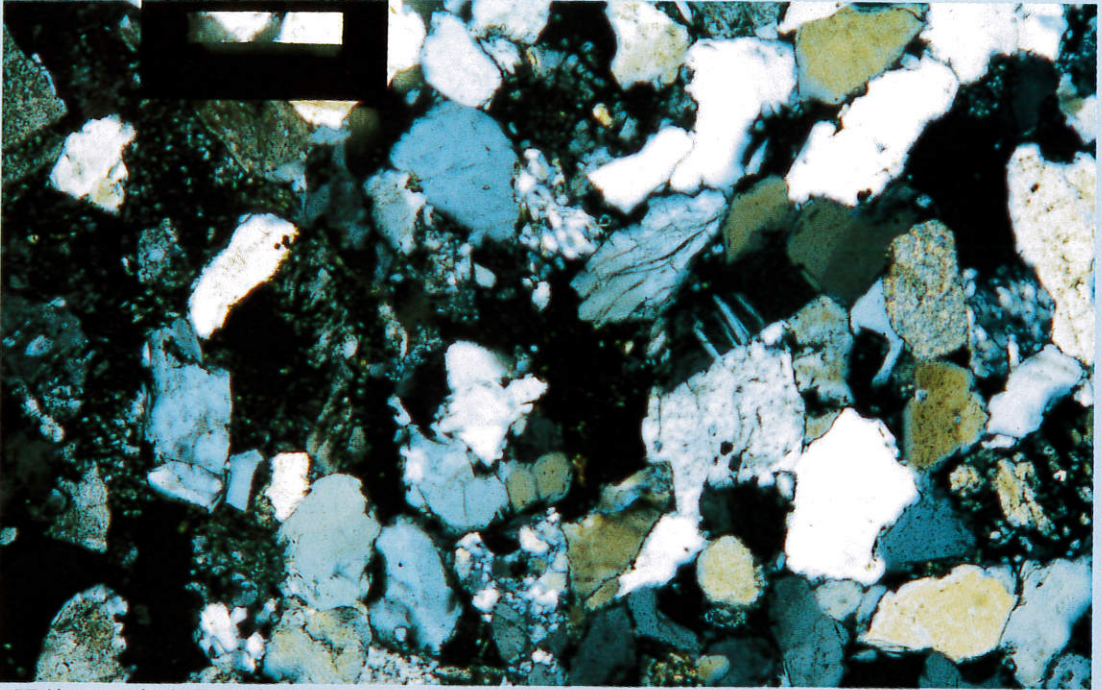


照片一 大桶山細砂岩(C52, 5.5m)之顯微照片, 正交偏光,  $+\lambda$ , 標尺長 0.32mm,  $\sigma_c = 56\text{MPa}$ , 泥質膠結

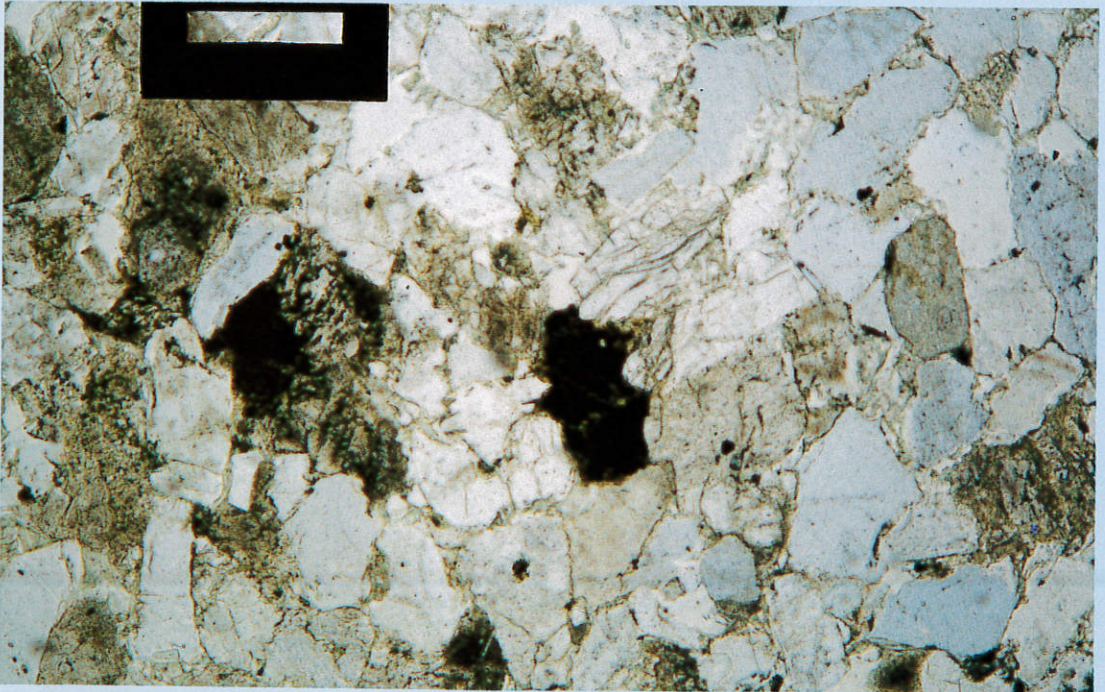


照片二 同照片一, 平行偏光



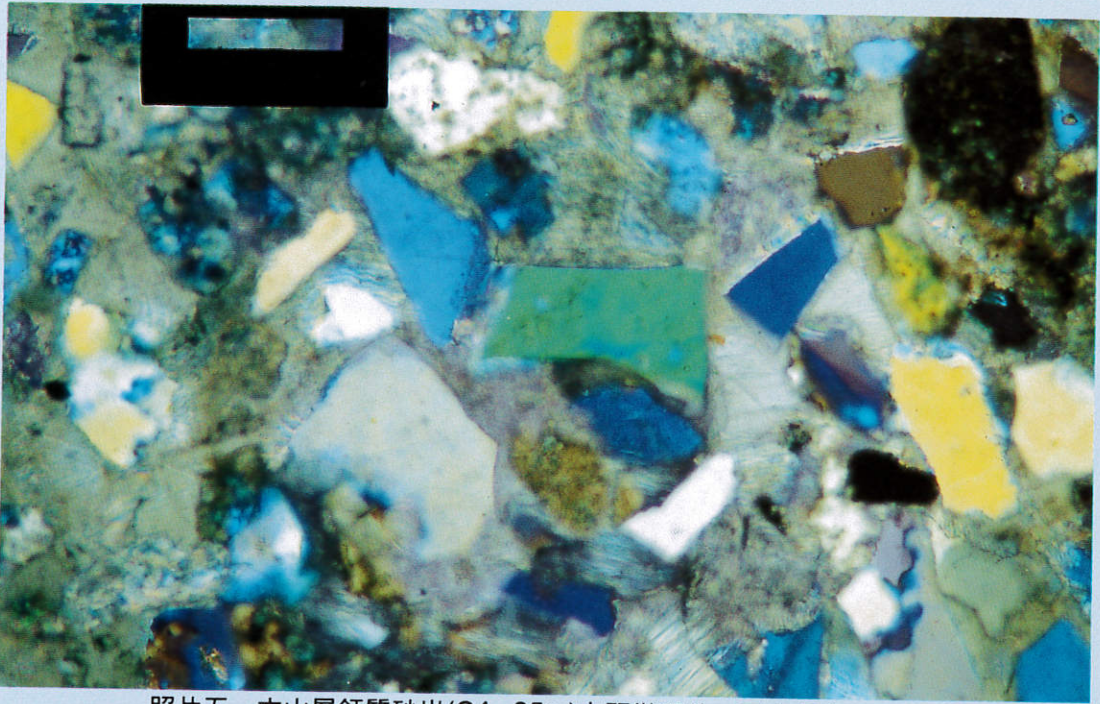


照片三 木山層砂岩(C4, 70m)之顯微照片，正交偏光，+ $\lambda$ ，標尺長 0.32mm， $\sigma_c=48\text{MPa}$ ，泥質膠結

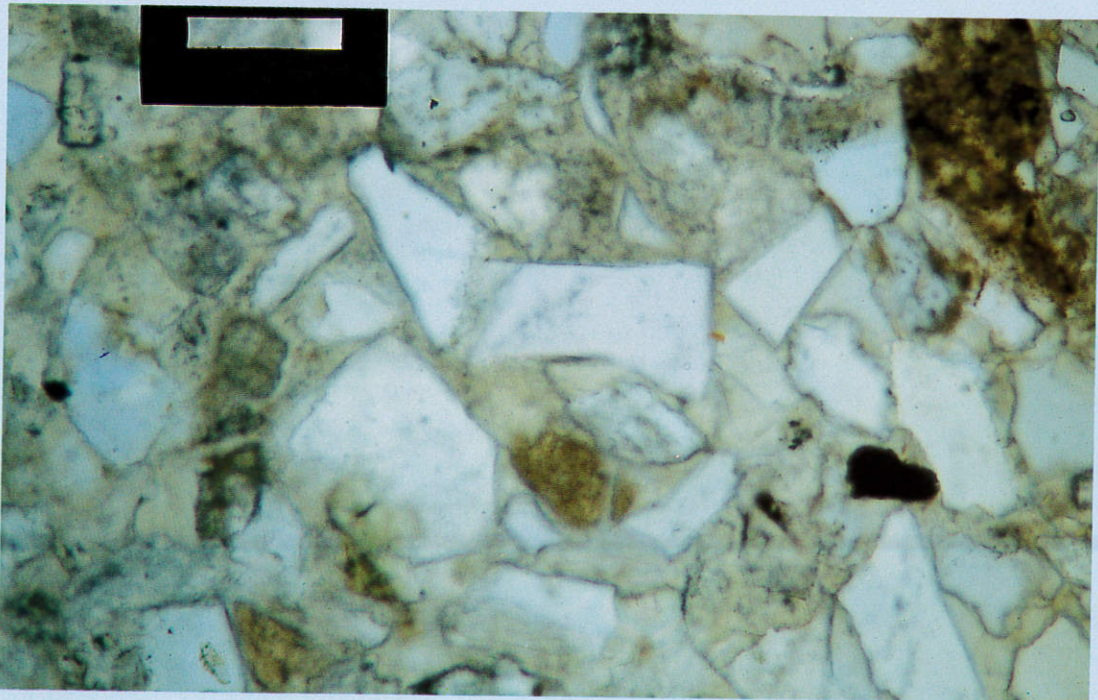


照片四 同照片三，平行偏光



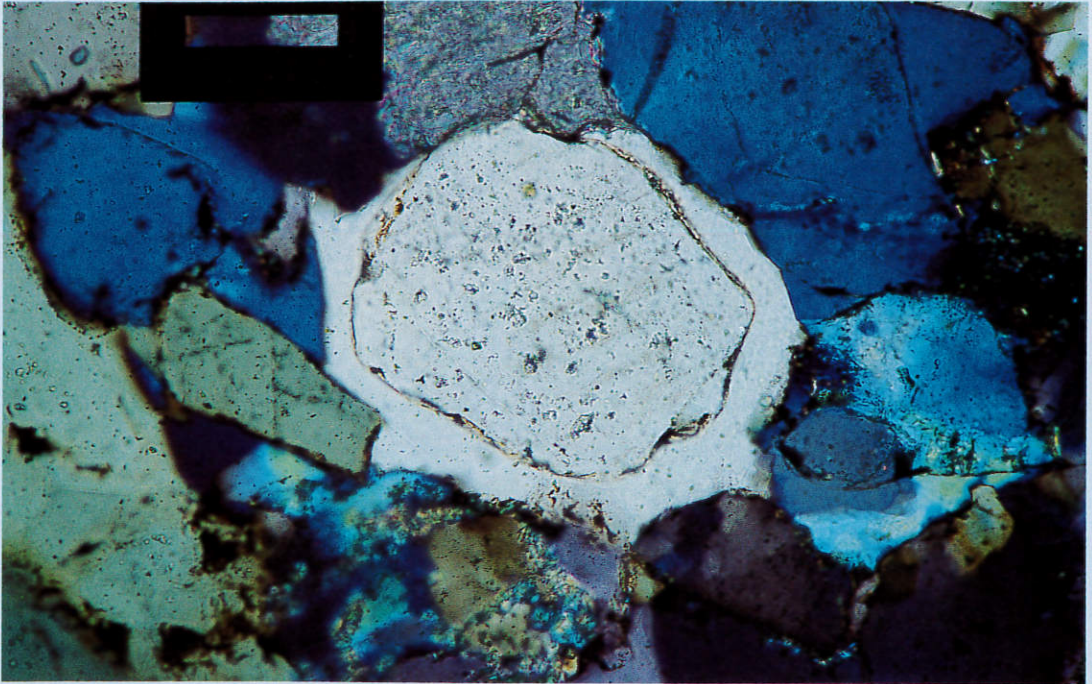


照片五 木山層鈣質砂岩(C4, 85m)之顯微照片, 正交偏光, + $\lambda$ , 標尺長 0.32mm,  $\sigma_c = 85.4\text{MPa}$ , 方解石膠結

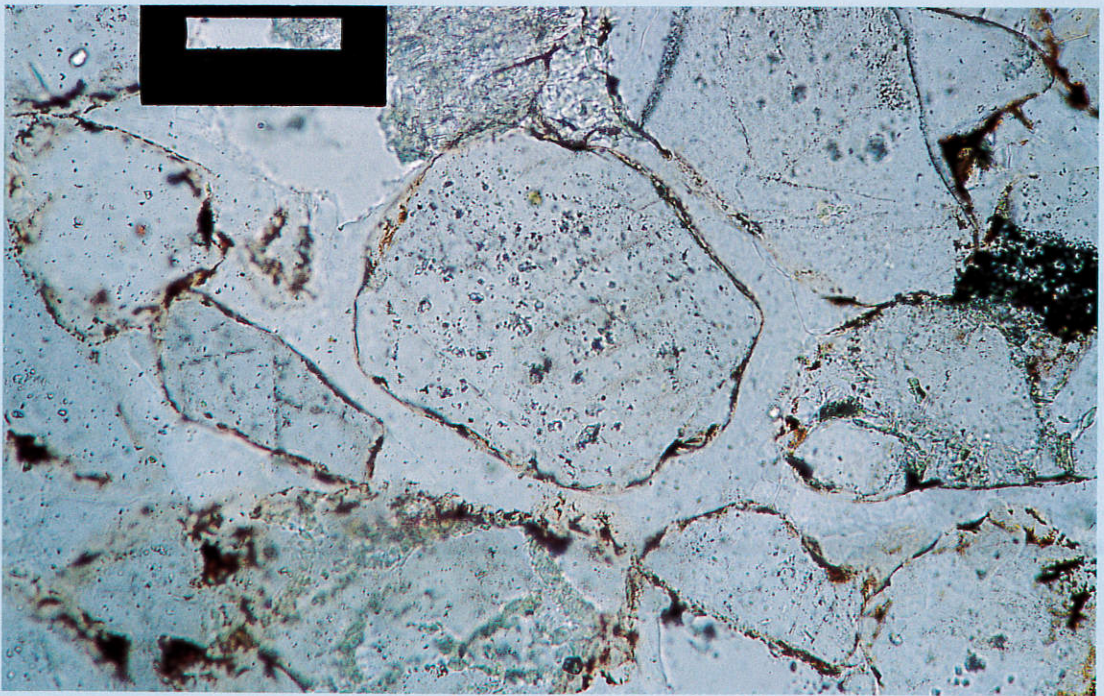


照片六 同照片五, 平行偏光



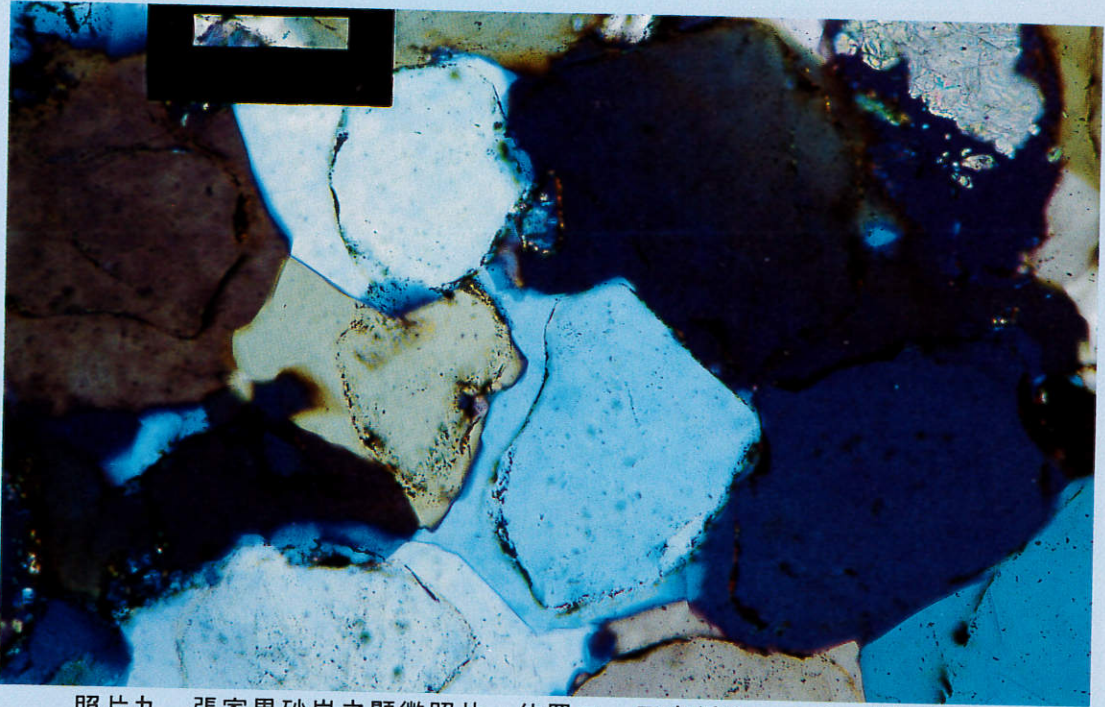


照片七 張家界砂岩之顯微照片，位置一，正交偏光， $+\lambda$ ，標尺長 0.16mm，  
同軸外長式膠結， $\sigma_c = 260\text{MPa}$

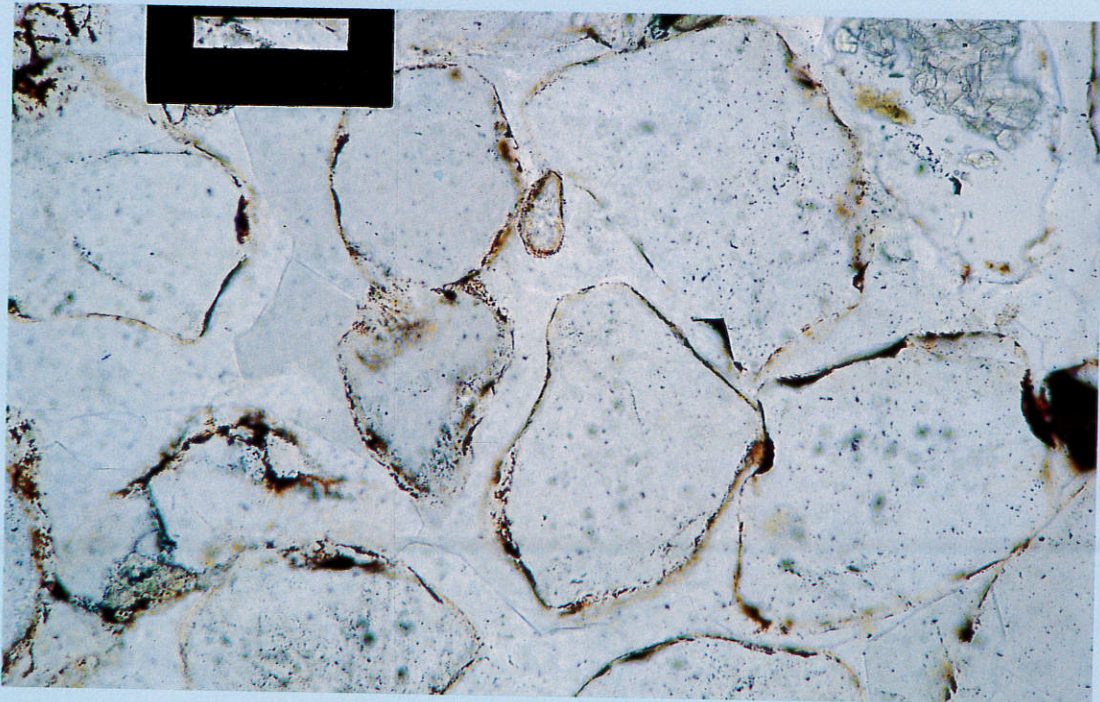


照片八 同照片七，平行偏光



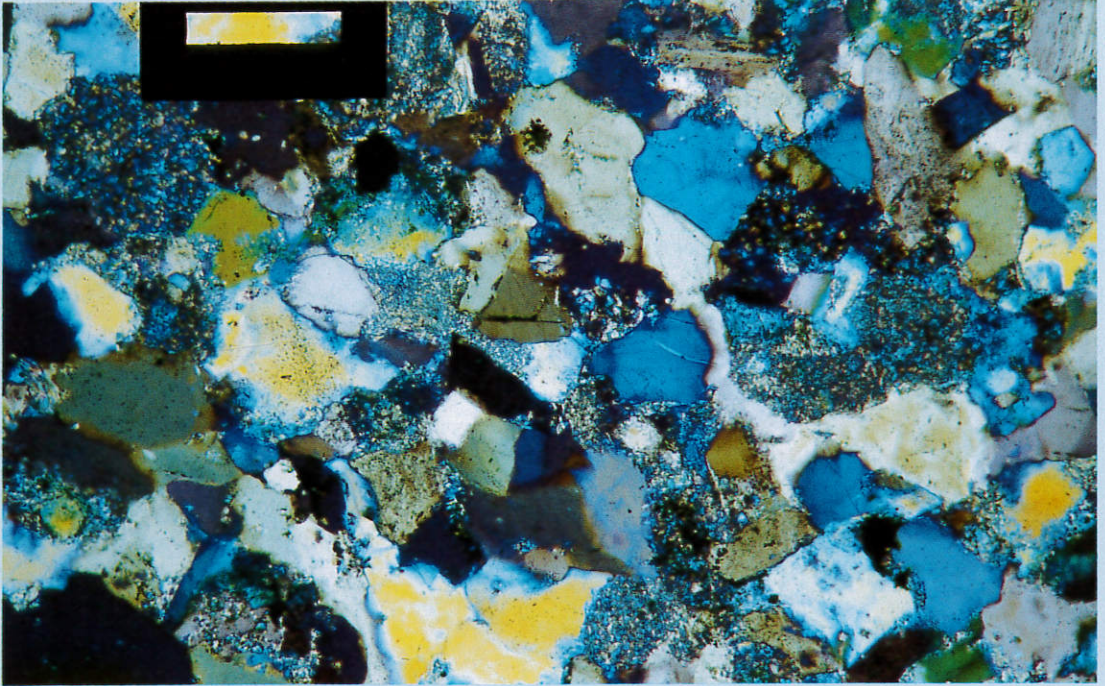


照片九 張家界砂岩之顯微照片，位置二，正交偏光，+ $\lambda$ ，標尺長 0.16mm，多個同軸外長之石英顆粒。

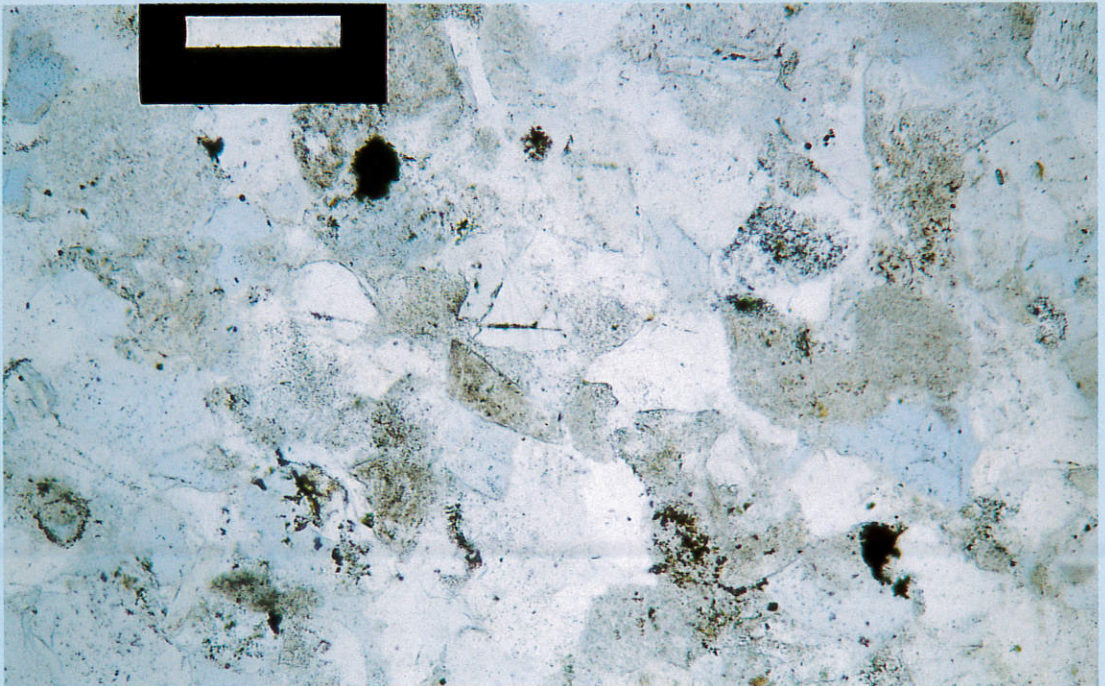


照片十 同照片九，平行偏光



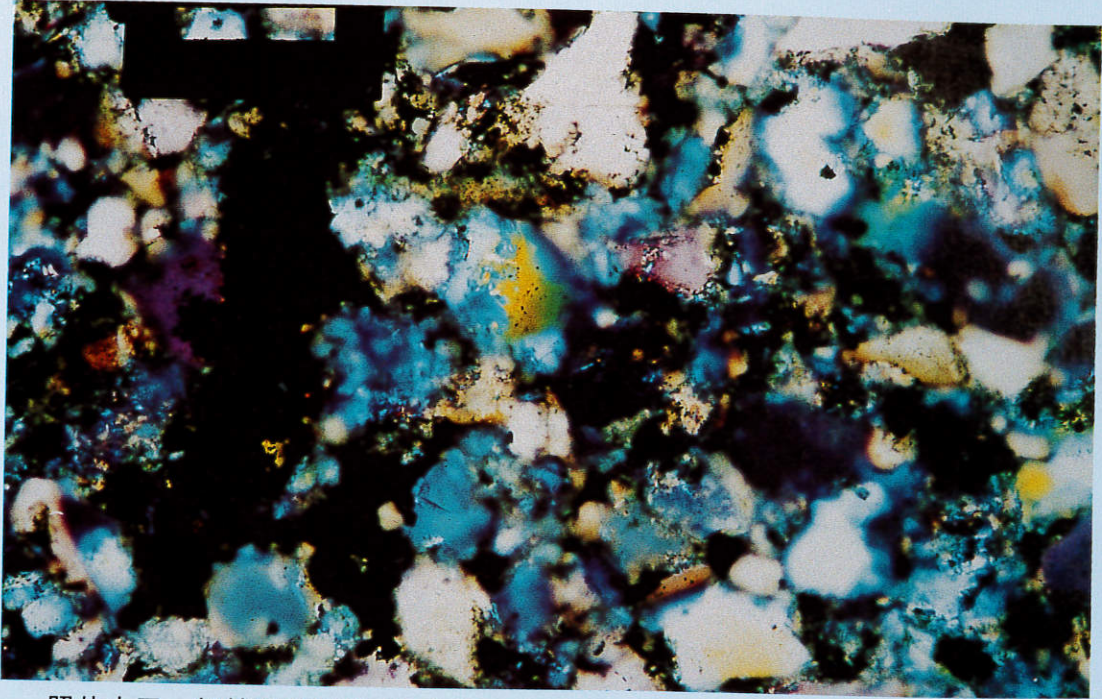


照片十一 四稜砂岩(PH-29, 29.5m)之顯微照片, 正交偏光,  $+λ$ ,  
標尺長 0.32mm, 壓溶式膠結,  $σ_c=130\text{MPa}$

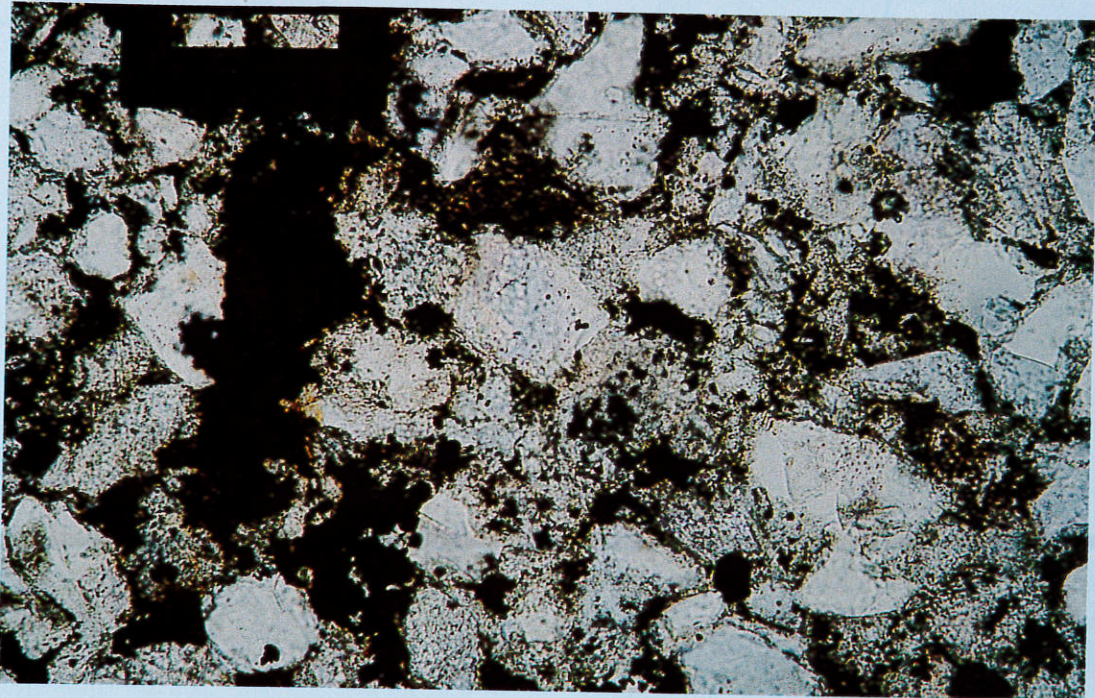


照片十二 同照片十一, 平行偏光



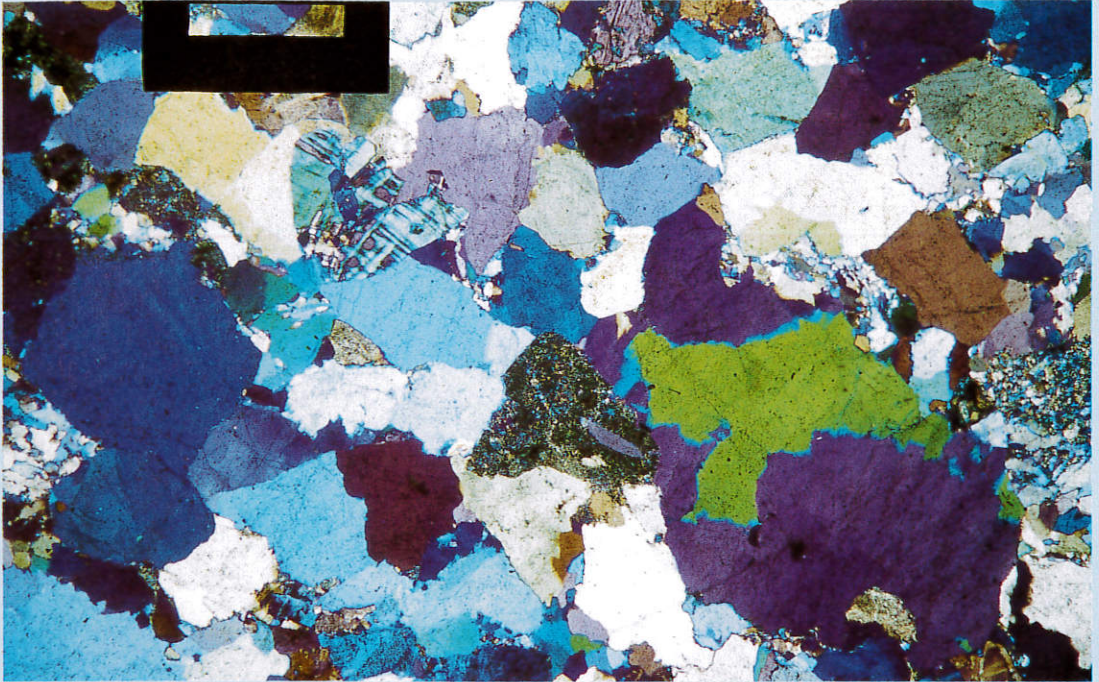


照片十三 細粒四稜砂岩 (PH-29, 178.5m) 之顯微照片, 正交偏光, + $\lambda$ , 標尺長0.16mm,  $\sigma_c=166\text{MPa}$

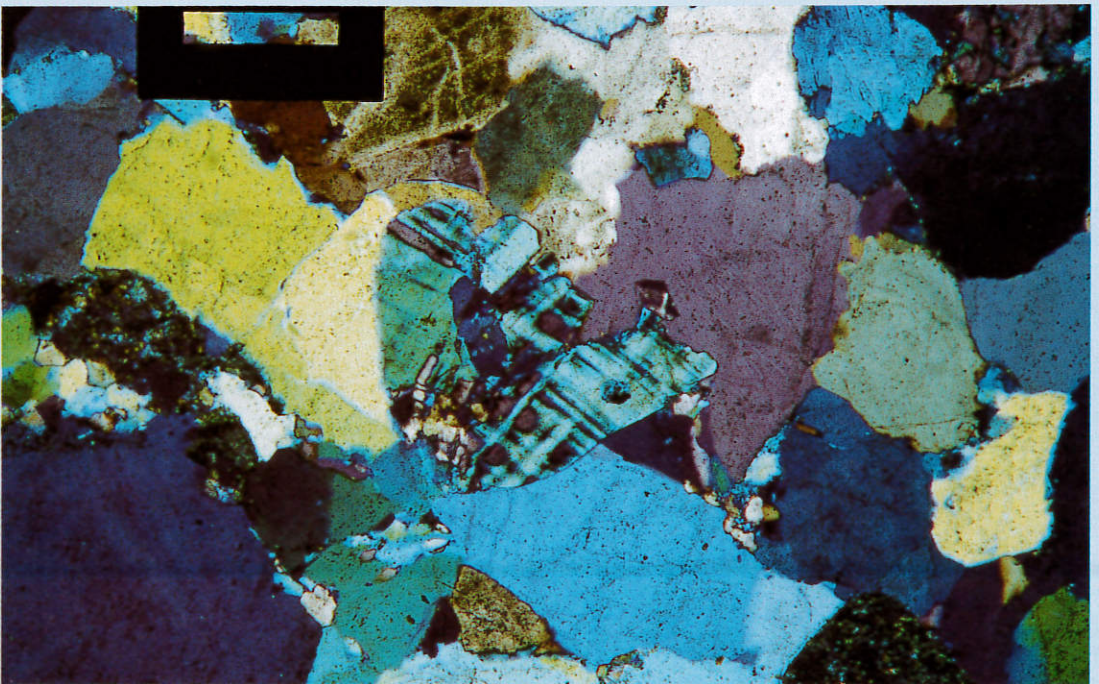


照片十四 同照片十三, 平行偏光, 孔隙中亦多石英



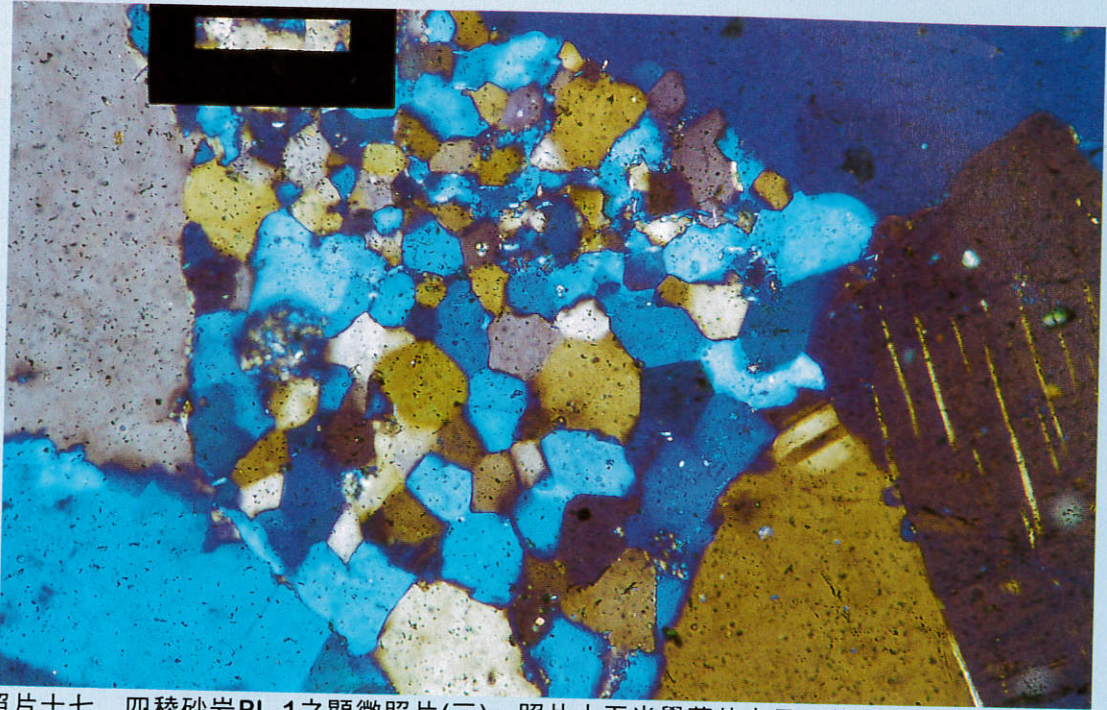


照片十五 四稜砂岩PL-1之顯微照片(一)，正交偏光， $+\lambda$ ，標尺長1.28mm，高度壓溶式膠結，標尺左上角可見一具有顯微文象組織之顆粒

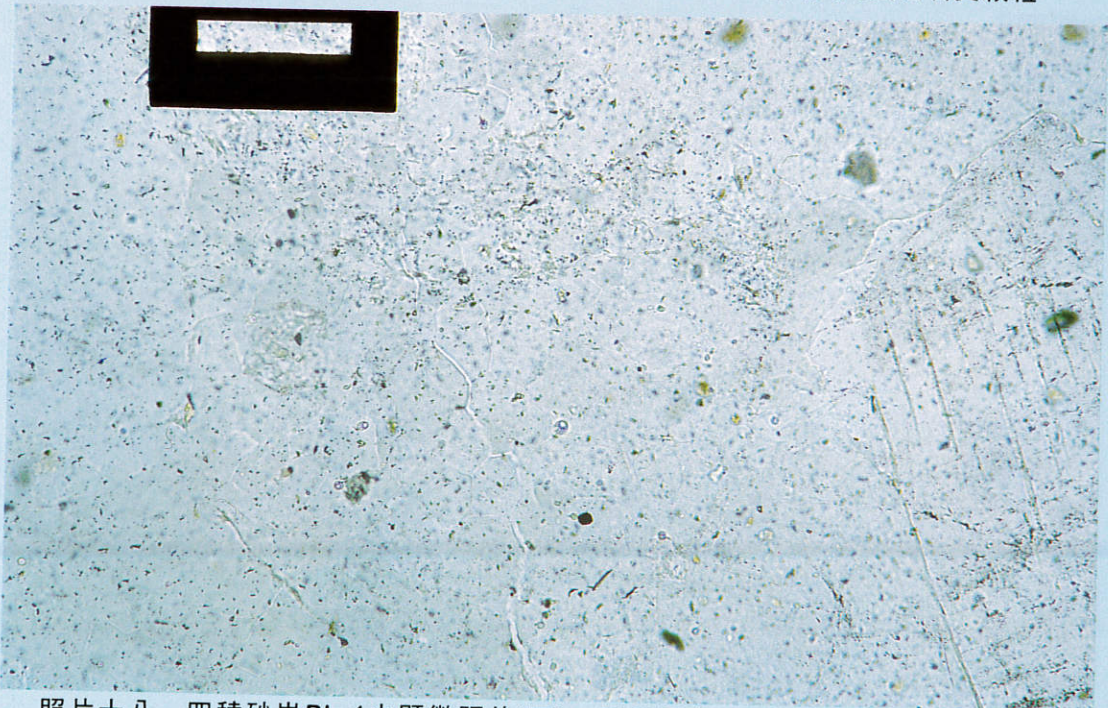


照片十六 四稜砂岩PL-1之顯微照片(二)，正交偏光， $+\lambda$ ，標尺長0.64mm，為照片十五光學薄片之局部放大



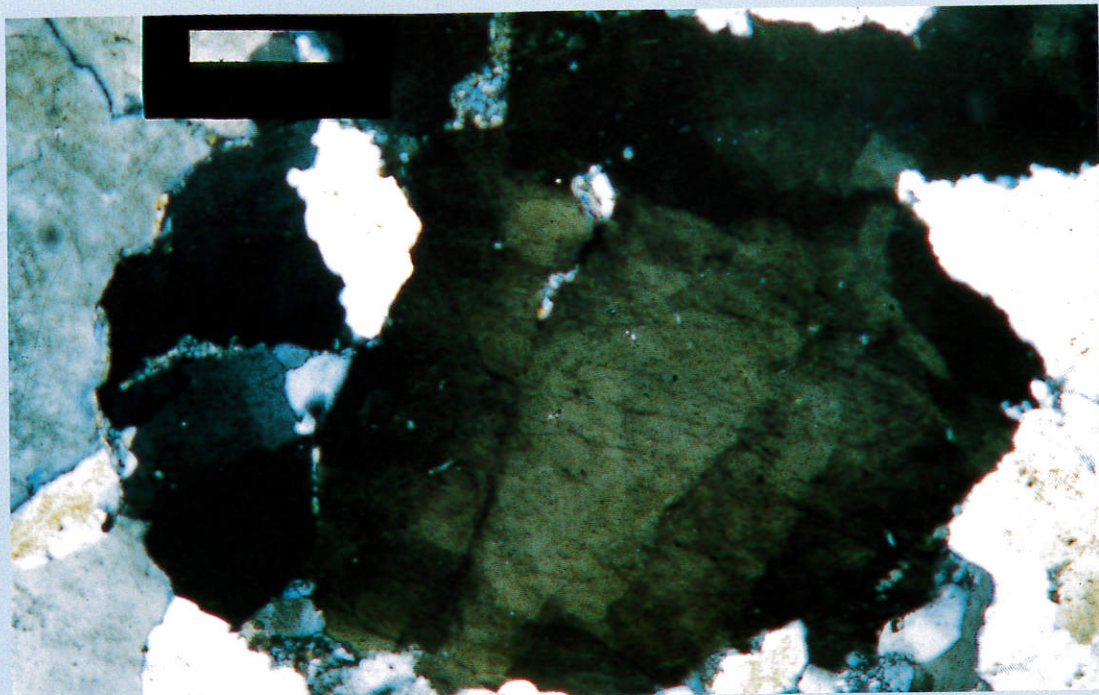


照片十七 四稜砂岩PL-1之顯微照片(三), 照片十五光學薄片之另一位置並加放大(標尺長0.16mm, 正交偏光),  $+ \lambda$ , 示多晶質石英顆粒與其周圍之石英顆粒

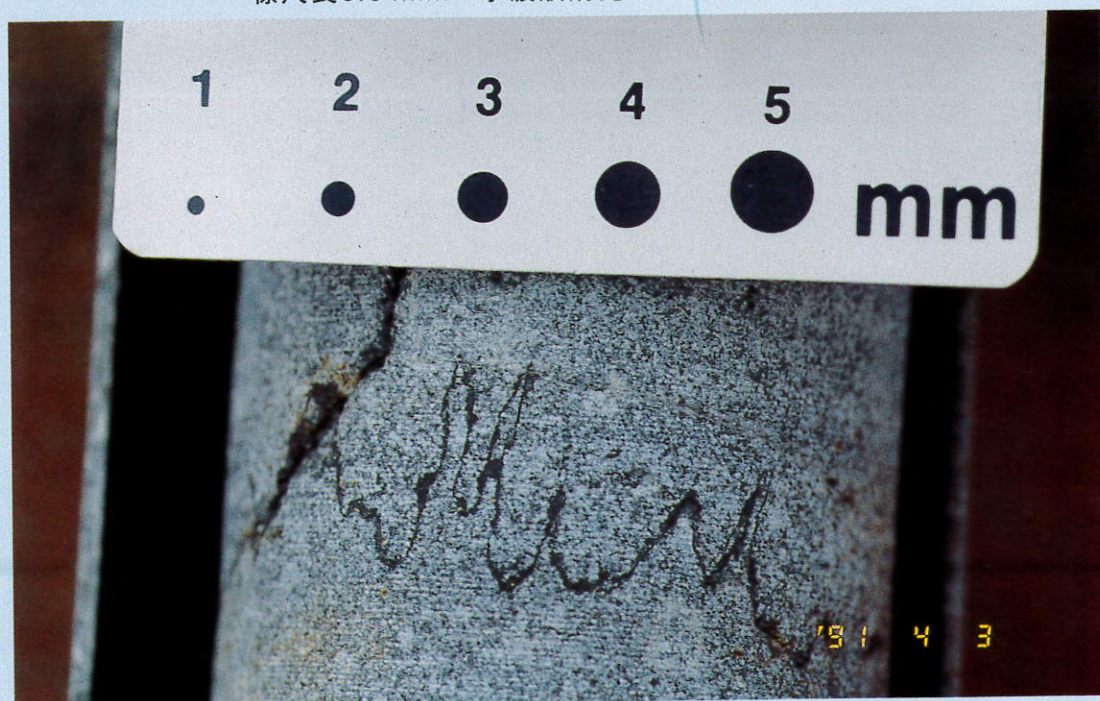


照片十八 四稜砂岩PL-1之顯微照片(四), 平行偏光, 整片透明, 顯示此一岩石光學片在此範圍內已是一片石英板了





照片十九 四稜砂岩PL-1之顯微照片(五)，正交偏光，拔除石膏濾片，標尺長0.64mm，示波狀消光



照片二十 四稜砂岩PH-29(330m)岩心及溶接線(stylolite)