

# 加砂水刀鑽切岩石行為探討

## A STUDY OF ROCKS DRILLING AND CUTTING WITH ABRASIVE WATERJETS

鄭品聰\* 黃燦輝\*\* 鄭富書†

Piin-Tsung Cheng Tsau-Hwei Huang Fu-Shu Jeng

\* 博士班研究生 \*\* 教授 † 副教授

國立台灣大學土木工程學系

\* Graduate student \*\* Professor † Associate Professor

Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 10617, R.O.C.

### Abstract

This paper studies the behavior of rocks drilled and cut by abrasive waterjets to understand the mechanism of fracture and improve the efficiency of application. A series of laboratory tests with various rocks samples, jet pressures, orifices, mixing tubes and operation conditions (included abrasive properties) have been carried out. In order to investigate the factors affecting the fractured types, visual inspection and microscope examining are conducted on fracturing surfaces of various rocks cut by different jet conditions. The results show that pump pressure, orifice, local exposure time, traverse rate, cutting pass, abrasive mass flow rate and property of rock play an important role on its fracturing behavior, and the fracturing threshold pressure approaches to the tensile strength of the rocks. For the test parameters, it is believed that two sets of critical parameters exist. First, there are minimum threshold values, which must be exceeded to initiate the material destruction process. Second, critical values (transverse rate, standoff and abrasive content, etc.) for the test parameters exist which should not be exceeded in order to ensure an effective drilling and cutting process. A comparative study on micro-removal phenomenon of various rocks impacted by abrasive waterjets showed that different rock properties contribute to different mechanisms. Based on the experimental results, it is also found that typical fracturing behavior of abrasive waterjets on marble and granite, such as punch a hole or slotting.

**Keywords:** abrasive waterjets, affecting factors, micro-removal.

### 摘要

本文旨在運用加砂水刀進行一系列鑽切花崗岩及大理岩之室內實驗，以探討其鑽切能力之行為與影響因素。經實驗成果顯示，鑽切能力之主要影響參數為：水刀壓力、流量、施打時間或橫移速率、切槽道數及磨粒流率，而岩石鑽切所需之門檻壓力約為其抗張強度。為達有效率之鑽切作業，實驗條件中存有兩項關鍵參數，即水刀壓力應超出門檻壓力，以及操作參數（橫移速率、射距及磨粒含量比等）不宜超出其臨界值。本文經由大理岩與花崗岩的切割表面之微觀觀察顯示：大理岩表面有沿劈理破壞之跡象並有磨粒附著；花崗岩表面則無劈理破壞而有不同礦物顆粒間的沿晶破壞跡象及磨粒嵌入；另花崗岩及大理岩表面之典型破裂形態以穿孔或凹槽為主。

**關鍵詞：**加砂水刀、影響因素、微觀移除。

## 1. 前言

水刀撞擊材料表面主要藉由動量轉換以達到移除材料之目的。以水刀特有精準與低損傷之鑽切優點，應用於岩石工程開挖作業上，可降低開挖面的超挖與過度損傷等問題，深具發展潛力。經研究顯示；

純水水刀可有效開裂單壓強度小於 50MPa 之岩石，至於更高強度岩石，可於水束中添加磨粒（稱為加砂水刀），以提昇水刀之鑽切能力 [1]。加砂水刀為一新創的材料加工工具，目前已普遍應用於工業界，如定點鑽孔、線狀切割或表面處理等作業，惟對岩石工程之研究與應用，仍較缺乏。因此為瞭解加砂水刀於岩

石工程的應用範圍與效率，探討鑽切較高強度岩石之影響因素與行為，實為一重要的課題研究。

應用高速水射流進行材料移除於 1960 年代左右既已成型 [2]，而以純水水刀進行鑽切岩石能力之研究成果，最早係由 Zelenin (1958) 所提出，然對於高強度、具韌性與延展性之材料，則加工效率不佳，因此早期水刀於工業界的應用並不普遍，直至 1980 年代後隨加砂水刀的誕生，得大幅提昇水刀作業能力及範圍，始被工業界大量應用於各類材料加工製作上 [3~6]。由前人研究成果顯示，影響加砂水刀鑽切材料的能力與行為之因素，甚多且複雜，而加砂水刀於鑽切岩材之應用研究，於 1980 年代後方陸續有成果提出，其中對影響參數之研究較深入者，首推 1997 年 Momber 及 Kovacevic [7] 對模擬岩石材料 (水泥砂漿) 的實驗分析，顯示重要之影響參數計有：水刀壓力、施打材料表面所停滯時間、磨粒流率及水刀橫移速率，其中前三項對切割深度呈非線性正相關，後一項呈非線性負相關；而材料破壞過程存有一最小門檻值，即水刀壓力必須超過此初始值，且水刀操作時其橫移速率必須小於一臨界值，加砂水刀方能有效切割材料。最後並藉由 Curbach 及 Eibl [8] 所定義的材料裂縫速度 (為材料壓力波速的四分之一)，進一步探討顯示：水刀門檻壓力與材料裂縫速度呈正相關，惟未能明確釐清加砂水刀較純水水刀更具效率之原因。最近 Li 及 Wang 等人 [9] 亦進行加砂水刀切割白色大理岩能力之實驗研究，其重要成果顯示：相同水刀條件下，水刀中磨粒速度與磨粒尺寸大小、磨粒流率呈負相關；換言之，磨粒尺寸愈大或磨粒流率愈高，則水刀鑽切能力愈差。相同水刀功率與磨粒乾密度下，磨粒尺寸大小與切割深度無關，意謂磨粒質量大小不影響水刀鑽切能力。混砂管長度變化對切割深度之影響不明顯；混砂管徑變化對切割深度呈非線性負相關，即混砂管徑愈小，水刀鑽切能力愈好。至於磨粒流率、混砂管徑大小及磨粒尺寸大小等，對水刀鑽切能力之影響程度，未進一步探討。

綜上所述，加砂水刀鑽切岩石行為之影響參數眾多複雜，其影響趨勢亦不一致；加之前人研究指出，加砂水刀之複雜移除材料過程中，常於切割面上留有不同條痕，此乃水刀切割材料時之不同漸進破壞所致 [10]，然切割面所留之破裂形態與水刀切割材料微裂隙間的關係，迄今仍未十分清楚，實有必要進一步釐清。

因此本文將進行一系列加砂水刀鑽切花崗岩及大理岩的室內實驗，透過整理與分析，以期全盤瞭解加砂水刀鑽切岩石能力之影響因素與行為，尤其是混砂管尺寸、磨粒 (如流率、尺寸、幾何、密度等性質) 與砂、水之流率比等條件對水刀鑽切行為的影

響。文中並期望進一步釐清水刀門檻壓力與材料強度之關係；以及岩石切割表面所呈現之破裂形態與微觀裂隙，以期能對加砂水刀鑽切岩石之機制，有進一步的瞭解。

## 2. 水刀設備與實驗項目

加砂水刀主要設備包括：低壓濾水系統、高壓增壓幫浦、水刀機組 (包含高壓管件、Y 型刀組、噴嘴、混砂室及混砂管等)、磨粒供給系統、X-Y 操作平台及電腦伺服控制系統等，詳如圖 1 所示。本文實驗所用水刀機具為 Flow 6XS-55 型，幫浦為增壓器式，最大壓力可達 385MPa (約 55000psi)，最大流量為 1.93L/min，可用噴嘴直徑介於 0.076mm (0.003in) 至 0.229mm (0.009in) 間，最大功率為 12.14kW。其主要操作程序如下：

- (1) 首先透過低壓抽水幫浦將水壓加壓至 0.46 ~ 0.56MPa，並藉由蓄壓器保持壓力的穩定。低壓水進入增壓機前需先過濾水中的雜質，以免對管路元件及噴嘴造成傷害，本文採用的濾心網孔依序為 10 $\mu$ m、1 $\mu$ m 及 0.5 $\mu$ m 三道。
- (2) 壓力主機利用馬達帶動油壓幫浦，以供應高壓油流至增壓幫浦，藉由 20:1 面積比的油壓來回運動，將水壓提昇至所設定的工作壓力。

此水刀具有高切削力，其 Y 型刀組允許之磨粒混入速度較高，可有效提昇磨粒之撞擊速度；此水刀採用後混式加砂系統 (injection AWJ)，透過高速水束穿過噴嘴 (orifice) 後所產生之真空將磨粒吸入，並於混砂室中會合，使水、磨粒與空氣混成一體後再進入混砂管 (mixing tube)，並加速射出管嘴 (nozzle)，以達鑽切材料之目的。

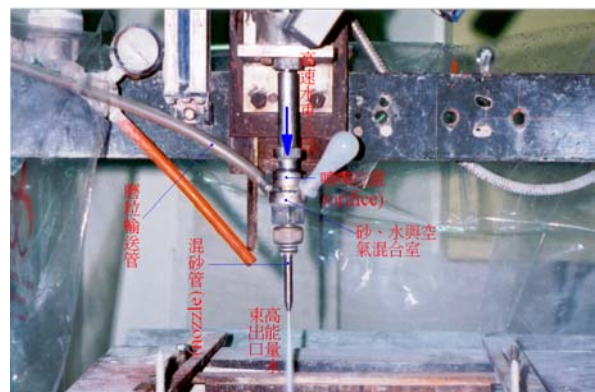


圖 1 加砂水刀之刀頭構件圖—Y型刀頭

Fig. 1 An illustration of Y type cutting head of abrasive waterjets

由管嘴射出之磨粒速度每秒可高達數百公尺，受水速、磨粒與水之混合比、動量傳遞效率係數等之影響。依據 Momber 及 Kovacevic (1997b) [11] 研究知磨粒射出噴嘴後之速度  $V_p$  (m/s)，可表為

$$V_p = \eta_{mix} \times \frac{V_w}{1 + \theta} \quad (1)$$

式中  $\eta_{mix} = 1.1426 \times P_w^{-0.0439}$ 、 $V_w = 44.3 \sqrt{P_w}$ 、 $\theta = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w}$ 。其中， $\eta_{mix}$  為水刀動量傳遞效率係數，介於 0.65 ~ 0.98 間， $V_w$  為水刀之水速 (m/s)， $\theta$  為流率比；而  $P_w$  為水刀壓力 (MPa)， $\dot{m}_a$  為磨粒流率 (g/sec)， $\dot{m}_w$  為水束流率 (g/sec)。

本文所進行之實驗分為：(1) 定點貫入及 (2) 線狀切槽兩部分，其中規劃之項目及採用之水刀條件，詳如表 1 與表 2 所示。另為便於實驗參數變化之影響比較，本文選擇一基本參考實驗組，以供他組作參數比較，該組之水刀壓力為 210MPa，噴嘴直徑為 0.229mm (此條件下水束流率為 23.91g/sec)，混砂管徑及長度分為 1.016mm 與 100mm，施打時間 (水刀接觸岩材時

表 1 定點貫入實驗之項目與條件

Table 1 Penetration conditions and parameters

條件說明		實驗參數變化值
項目規劃		
水刀條件	壓力 (MPa)	70、105、140、175、210、294、300
	噴嘴直徑 (mm)	0.127、0.178、0.229
	混砂管徑 (mm)	0.76、1.02、1.27
操作條件	施打時間 (sec)	3.5、6、8.5、11、16、21、30、45、60、70、75
磨粒性質	流率 (g/sec)	0.06、1、4、7、10
	材質 (平均乾密度 $g/cm^3$ )	石榴石 (3.85)、渥太華砂 (2.62)、越南石英砂 (2.55)、福隆砂 (2.45)
	尺寸大小 (mm)	0.15 (100 號石榴石)、0.25 (60 號石榴石)、0.425 (40 號石榴石)
	幾何形狀	次粒狀 (越南石英砂)、次圓狀 (渥太華砂)
	硬度	石榴石 (7~7.5)、渥太華砂 (7)、越南石英砂 (7)、福隆砂 (不詳)

間) 為 8.5sec，射距 (水刀距岩石表面之淨空) 為 15mm，磨粒流率為 4g/sec，磨粒乾密度平均為  $3.845g/cm^3$ ，磨粒尺寸為 0.25mm，磨粒幾何形狀為次粒狀，橫移速率為 5mm/sec，切槽道數為 1。本實驗過程中每次僅變動一個參數，其餘參數則固定不變；且定點貫入實驗同一參數均鑽打三點，而線狀切槽實驗則切割一次。本文所用之岩石種類與材質，詳如表 3 所示，其中大理岩試體採自花蓮榮工公司之和平礦場，岩中偶夾有黑灰色之雜質；而花崗岩試體來自中國大陸，品名為 China 623，外觀上呈白色，礦物顆粒明顯可見，詳如圖 2 所示。

表 2 線狀切槽實驗之項目與條件

Table 2 Cutting conditions and parameters

條件說明		實驗參數變化值
項目規劃		
操作條件	橫移速率 (mm/sec)	5、10、20、30、40、50、60
	切槽道數 (N)	1、2、3、4、5
	射距 (mm)	5、10、15、20、30、40
備註	1. 水刀基本條件：水刀壓力為 210MPa，噴嘴直徑為 0.229mm，混砂管徑及長度分別為 1.016mm 與 100mm，射距為 15mm。 2. 磨粒性質：磨粒流率為 4g/sec，磨粒平均乾密度為 $3.85g/cm^3$ ，磨粒尺寸為 0.25mm，磨粒為次粒狀。	

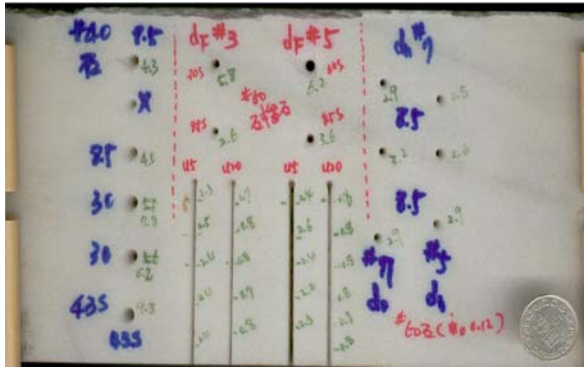
表 3 岩石種類與性質

Table 3 Mechanical properties of the used materials

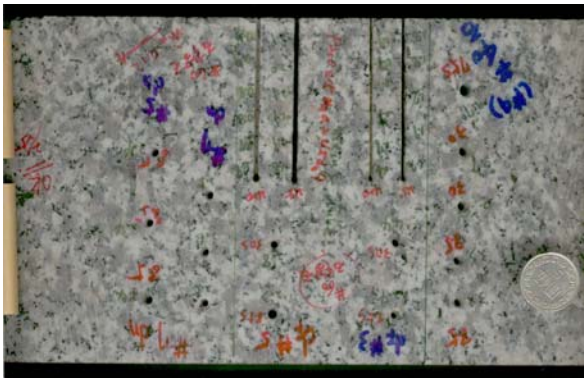
岩石種類	花崗岩	大理岩
岩石性質		
單壓強度 (MPa)	151.50	73.10
抗張強度 (MPa)	9.35	5.78
孔隙率 (%)	1.10	0.51
乾密度 ( $g/cm^3$ )*	2.65	2.74
楊氏模數 (GPa)*	58.54	50.86
壓力波速 (m/sec)	4700	4308
裂縫速度 (m/sec)**	1175	1077

註：“\*” 取自黃 [12]。

“\*\*” 裂縫速度為壓力波速的四分之一 [8]。



(1) 大理岩試體 (Marble)



(2) 花崗岩試體 (Granite)

圖 2 實驗之岩石試體

Fig. 2 Marble and granite specimen after drilling and cutting of abrasive waterjets

### 3. 鑽切岩石能力之影響因素探討

#### 3.1 定點噴入實驗

##### (1) 水刀壓力之影響

岩石於不同水刀壓力施打下，以強度比（水刀壓力／岩石單壓強度； $P_w/\sigma_c$ ）為水平軸，穿孔深度  $h$ （簡稱穿深）為垂直軸，結果如圖 3 所示。當水刀壓力愈大所得穿深急劇變大，惟強度比大於 2.0 後呈現平緩現象，顯示壓力太高所得岩石穿深效率有降低之趨勢。經對數迴歸可得下式：

$$h = 0.8325 \ln(P_w / \sigma_c) + 2.498 ; R^2 = 0.7953 \quad (2)$$

本實驗結果與 Momber 及 Kovacevic (1997a) 所得之趨勢相同。依據其研究知，磨粒撞擊動能隨水刀壓力增加而增加，惟水刀壓力若大幅提昇，因流體雷諾數增大相互擾動變大、流體的可壓縮及噴嘴側壁之摩

擦增加，導致砂、水混合效率降低，造成鑽切能力衰減。另由本實驗所拍攝照片顯示，砂、水混合過程將造成磨粒的碰撞碎裂，導致水刀動能的部分耗損，亦影響鑽切岩石之能力，如圖 4 所示。由圖 3 中知：在強度比軸上，存有一門檻值  $(P_w/\sigma_c)_{thr}$ ，水刀壓力需超出此一臨界值方可鑽切岩石，此臨界值稱為材料門檻壓力  $P_{thr}$  [13,14]。

依據 Momber 及 Kovacevic (1997a) 實驗參數分析顯示，當材料之裂縫速度  $V_{cr}$  愈高則所需之水刀門檻壓力亦愈大，經迴歸可得下式：

$$P_{thr} = 0.9209 V_{cr}^{0.6447} ; R^2 = 0.7942 \quad (3)$$

式中  $V_{cr} = V_p/4$ 。其中， $V_{cr}$  為材料裂縫速度 (m/s)， $V_p$  為材料壓力波速 (m/s)。據式(3)，則其所用模擬材料之水刀門檻壓力值為 58.5MPa ~ 86.2MPa，為其材料單壓強度的 2 ~ 15 倍。本研究透過式(2)求得穿深為零時，所對應壓力即本實驗花崗岩之門檻壓力為 8.0MPa，約為單壓強度的 0.05 倍、抗張強度的 0.84 倍；大理岩則為 3.7MPa，約為單壓強度的 0.05 倍、抗張強度的 0.62 倍。若以 Momber 及 Kovacevic (1997a) 所建議之式(3)估之，則本實驗花崗岩之門檻壓力約為 88.0MPa，為岩石單壓強度的 0.55 倍、抗張強度的 9.26 倍；大理岩則為 83.0MPa，為岩石單壓強度的 1.12 倍、抗張強度的 13.83 倍，顯偏高甚多。依據研究，本文結果與 Reh binder [15] 對自然岩石材料所作實驗之所得相近，即門檻壓力與岩石抗張強度較為接近，顯示 Momber 及 Kovacevic (1997a) 所定義者，較適合其所採用之水泥砂漿材料，而非一般自然岩石材料。

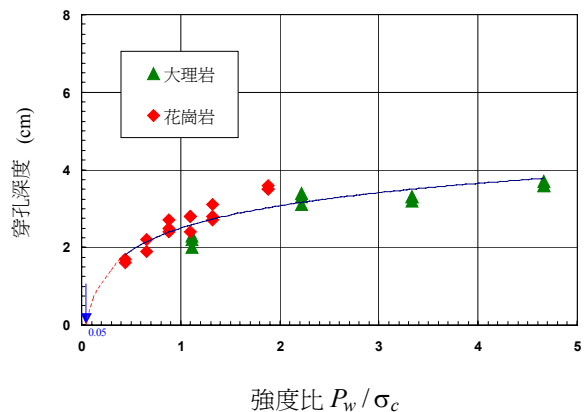
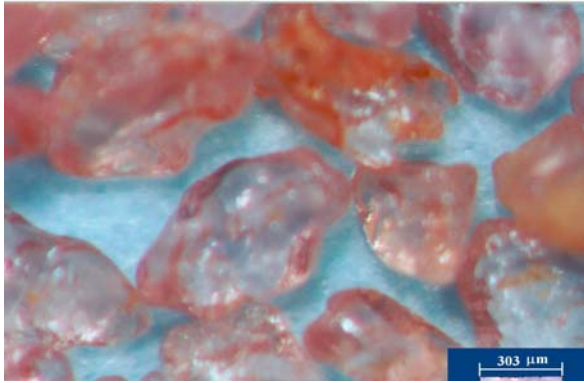
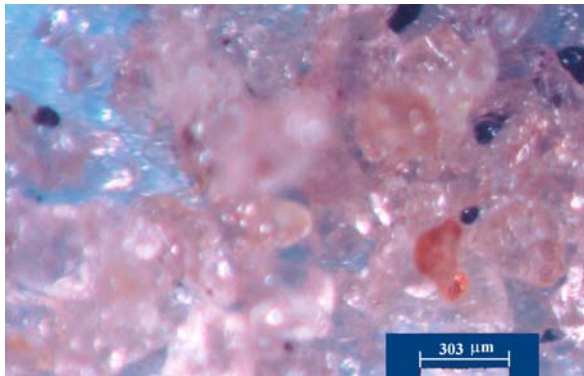


圖 3 岩石之強度比與穿孔深度關係

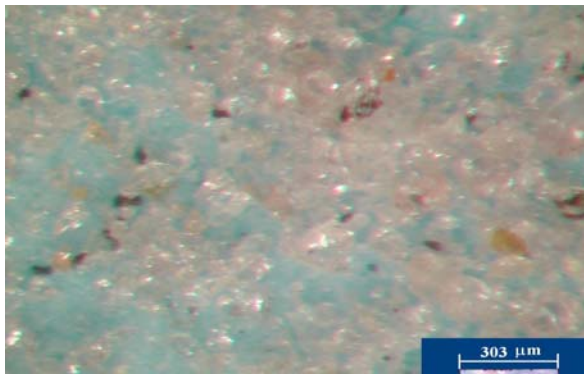
Fig. 3 Relation between strength ratio and penetration depth for marble and granite



(1) 原狀 (Original)



(2) 撞擊前 (Before impacting)



(3) 撞擊後 (After impacted)

圖 4 60 號石榴石之磨粒變化情形 (放大 66 倍)  
Fig. 4 Illustrations on geometry variation of garnet with diameter 0.25mm (amplification factor 66)

綜合本項實驗結果顯示：當材料單壓強度愈大，穿孔所需之門檻壓力愈高；而門檻壓力則與岩石抗張強度接近。

(2) 噴嘴直徑之影響

不同磨粒流率 (1g/sec、4g/sec) 下，以三種不同

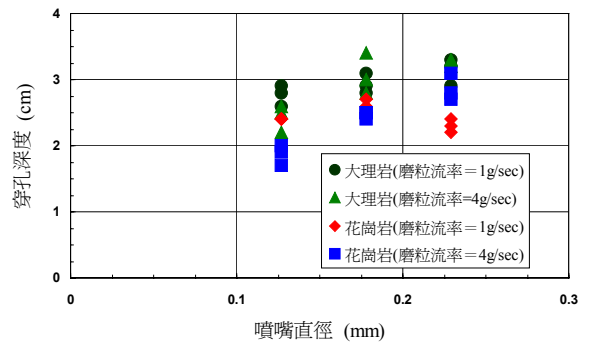


圖 5(a) 不同磨粒流率下之噴嘴直徑與穿孔深度關係

Fig. 5(a) Relation between orifice diameter and penetration depth under various abrasive flow rates

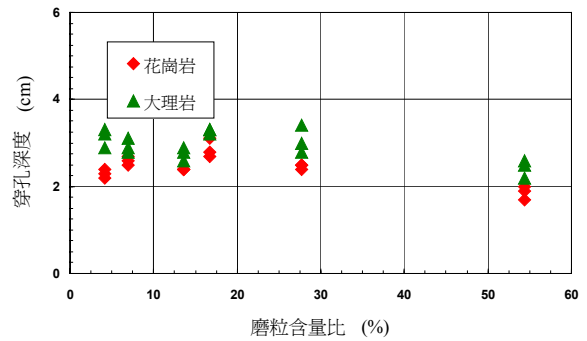


圖 5(b) 磨粒含量比與穿孔深度關係

Fig. 5(b) Relation between abrasive content and penetration depth (under various orifice diameter)

噴嘴直徑 (0.127mm、0.178mm 及 0.229mm) 進行定點貫入實驗，結果如圖 5(a) 所示。噴嘴直徑較大為 0.229mm 時，採高磨粒流率所得穿深較佳；噴嘴直徑較小為 0.127mm 時，則反之；而噴嘴直徑為 0.178mm 時，磨粒流率不同對穿深結果則互有高低。

探究其因，噴嘴直徑愈大，水刀之輸出流量亦愈大，對岩石具有較大的破壞能力，惟當水束中磨粒含量比 (磨粒流率/水束流率) 過高時，水束受磨粒之擾動較大，且磨粒間及對管壁之碰撞機率大增，導致過度耗損水刀動能，造成磨粒之撞擊速度下降致破壞岩石的能力降低。經觀察磨粒含量比對穿深之影響知：當磨粒含量比超過 30% 後，穿深明顯變小，如圖 5(b) 所示。因此，在同一水刀壓力下，欲得一較佳的穿深效率，除了噴嘴直徑愈大外，需有適當之磨粒流率配合方可；即噴嘴直徑大小與磨粒流率間，有一最佳化組合，方得發揮最大的穿孔效果。

(3) 混砂管徑之影響

在相同磨粒含量比 (磨粒流率 4g/sec/水束流率 23.91g/sec) 16.73% 下, 分別以 0.76mm、1.016mm 及 1.27mm 等三種混砂管徑探討水刀對岩石之穿深影響, 結果如圖 6 所示。當混砂管徑愈大所得穿深愈深, 且呈正比例增加。

一般而言, 混砂管徑較窄者因空間較小, 易造成磨粒間, 以及磨粒與管壁間的碰撞, 本研究中三種混砂管徑與磨料尺寸 (0.25mm) 之比, 依序為 3.04、4.064 及 5.08, 以混砂管徑 0.76mm 所得比值最小, 導致較大的動能耗損及磨粒撞擊速度下降, 對岩石的破壞能力降低。因此, 與前節(2)噴嘴直徑之影響相同, 即同一水刀條件下, 欲得一較佳的穿深效率, 除需有適當之磨粒流率, 仍需有一適當的混砂管徑配合; 即混砂管徑大小與磨粒流率間, 亦存有一最佳化組合, 方得發揮最大的穿孔效果。

(4) 施打時間之影響

水刀施打時間對岩石之穿深影響, 如圖 7 所示, 呈非線性正相關。施打時間較短者所得之穿深速率較佳, 惟當施打時間愈長時, 其穿深速率有呈現平緩之趨勢, 顯示水刀定點穿孔效率隨穿深增加而呈遞減之勢。當施打時間相同下, 大理岩所得穿孔深度較花崗岩為深, 且隨時間之增加其差距亦大, 顯示水刀對強度較低之大理岩, 具有較佳的穿深能力。

(5) 磨粒流率之影響

在相同水束流率 (23.91g/sec) 下, 不同磨粒流率對岩石之穿深結果, 如圖 8(a) 與圖 8(b) 所示。磨粒流率低於 6g/sec 呈正相關, 高於 6g/sec 則呈負相關。由圖中可知: 水束中混入微量磨粒即可大幅提昇水刀鑽切岩石之能力, 惟當磨粒含量比增大, 如本文圖 8(b) 中超出 25% 後, 所得穿深反而變淺, 顯示水束中之磨

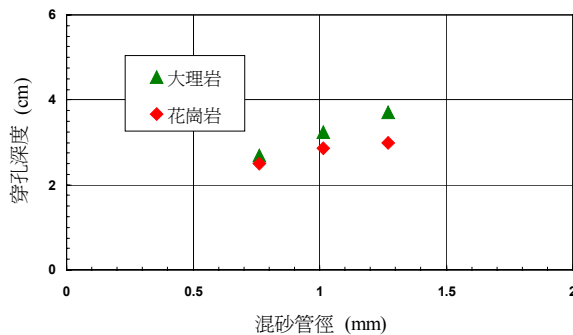


圖 6 混砂管徑與穿孔深度之關係

Fig. 6 Relation between diameter of mixing tube and penetration depth

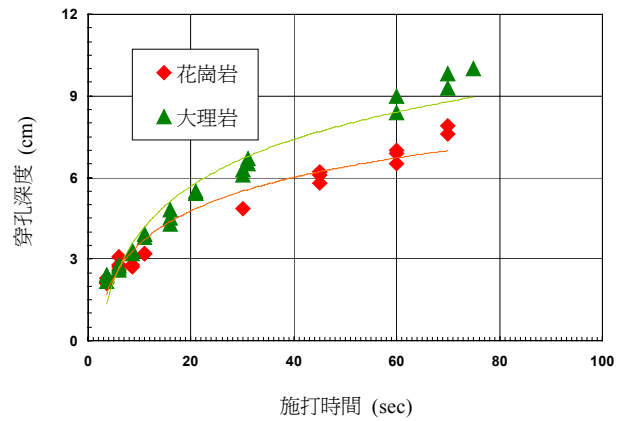


圖 7 水刀施打時間與穿孔深度關係

Fig. 7 Relation between impacting time and penetration depth

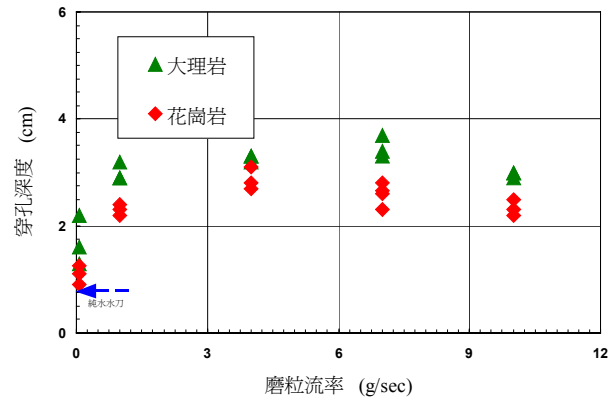


圖 8(a) 磨粒流率與穿孔深度關係

Fig. 8(a) Relation between abrasive flow rate and penetration depth

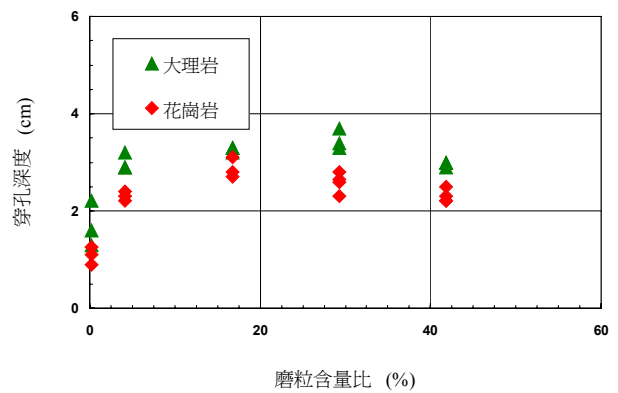


圖 8(b) 磨粒含量比與穿孔深度關係

Fig. 8(b) Relation between abrasive content and penetration depth

粒含量存有一最佳流率值 (optimum abrasive mass flow rate,  $\dot{m}_{a,opt}$ )，一旦超出此值將嚴重削弱水刀對岩石穿孔之能力。此現象如前(2)與(3)節所述，即水束中磨粒含量遞增過度將有礙水刀穿孔能力的發揮。

另磨粒供給速率過高，將導致輸砂管與混砂管件阻塞的現象 (即塞管現象)，嚴重折損水刀穿孔能力。圖 8(a) 中磨粒流率為零時 ( $\dot{m}_a = 0$ ，虛線箭頭所指處)，即為相同條件下純水水刀所得之穿深值，顯示水束中加砂確可大幅提昇穿孔岩石之能力，惟過量加砂將發生塞管現象而降低其效能。依本實驗條件而言，當混砂管徑 (1.016mm) 與磨料尺寸 (0.25mm) 之比為 4.08 時，磨粒含量比不宜超出超出 25%，方不致降低水刀穿孔能力。

#### (6) 磨粒乾密度之影響

不同施打時間下，水刀中混入相同粒徑之不同磨粒如：石榴石、渥太華砂、越南石英砂及福隆砂等，對花崗岩作定點貫入實驗，結果如圖 9 所示，而各磨粒乾密度見表 1。在施打時間相同下，以石榴石所得穿深高於其他磨粒，其差距隨時間增長而變大；其中越南石英砂及福隆砂所得結果相近。至於各磨粒於施打前、後之照片如圖 10(a) 與圖 10(b) 所示，均顯示施打後磨粒之碎裂程度，十分劇烈 (石榴石部分，見圖 4 所示)。

因此本實驗 (水刀輸出功率 2.98kW 及磨粒流率 4g/sec) 條件下，水束中混入磨粒之乾密度愈大其所產生的撞擊力愈高，所造成的穿深亦愈深。本實驗中石榴石乾密度最大 ( $3.85\text{g/cm}^3$ )，依序為渥太華砂 ( $2.62\text{g/cm}^3$ )、越南石英砂 ( $2.55\text{g/cm}^3$ ) 及福隆砂 ( $2.45\text{g/cm}^3$ )，與實驗所得吻合。

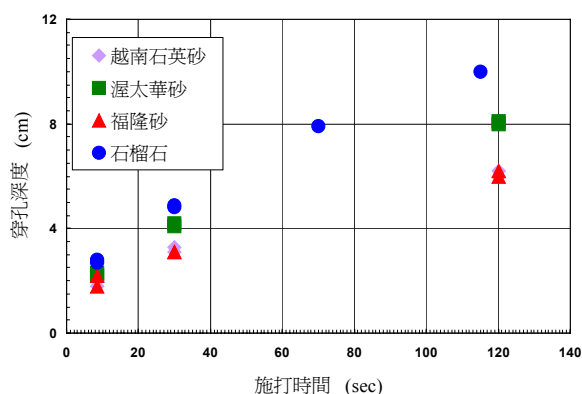


圖 9 磨粒材質之施打時間與穿孔深度關係 (岩石為花崗岩)

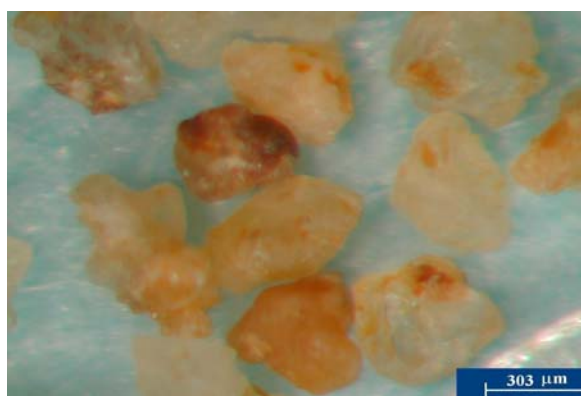
Fig. 9 Relation between impacting time and penetration depth under various abrasive density (granite)



(1) 渥太華砂 (Ottawa sand)



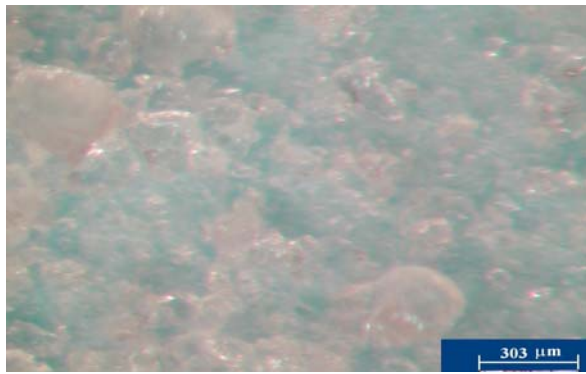
(2) 越南石英砂 (Vietnam sand)



(3) 福隆砂 (Fulong sand)

圖 10(a) 渥太華砂、越南石英砂與福隆砂之原狀顆粒 (#60 號; 放大 66 倍)

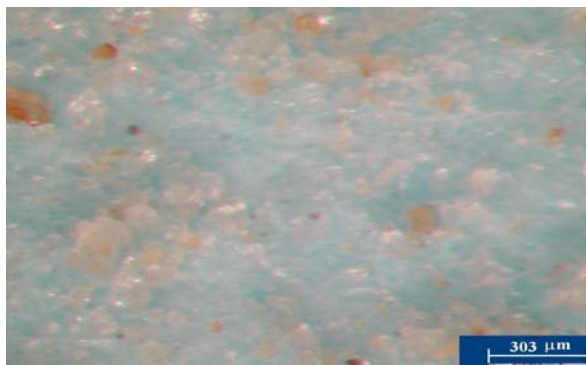
Fig. 10(a) Original grain of Ottawa sand, Vietnam sand and Fulong sand (left on #60 mesh; amplification factor 66)



(1) 渥太華砂 (Ottawa sand)



(2) 越南石英砂 (Vietnam sand)



(3) 福隆砂 (Fulong sand)

圖 10(b) 不同磨粒乾密度於撞擊後之破碎情形 (#60 號; 放大 66 倍)

Fig. 10(b) Fracture of various abrasive densities after impact (left on #60 mesh, amplification factor 66)

(7) 磨粒尺寸大小之影響

不同施打時間 (120sec、75sec、8.5sec) 下, 水束中混入三種不同尺寸 (100、60 與 40 號) 的石榴石 (0.15mm、0.25mm 及 0.425mm) 進行定點貫入實驗,

結果如圖 11(a) 所示。施打時間相同下, 磨粒尺寸愈大所得穿深愈深, 而貫穿試體厚度 (10cm) 所花費的時間亦愈短。

本實驗所採用之磨粒含量比為 16.73% (磨粒流率 4g/sec/水束流率 23.91g/sec) 小於圖 8(b) 中的臨界值 25%, 而混砂管徑 (1.016mm) 與磨料尺寸 (0.15mm、0.25mm 及 0.425mm) 之比分別為 2.4、4.08 及 6.8, 依前節(3)與(5)所述結果, 因磨粒間仍未發生劇烈碰撞與混砂管徑阻塞現象, 故磨粒尺寸愈大, 可得穿深效果愈佳。

實驗後磨粒之典型破碎情形, 如圖 11(b) 所示。顯示撞擊後 100 號 (原粒徑 0.15mm) 的破碎情況最劇烈, 依序為 60 號 (原粒徑 0.25mm) 與 40 號 (原粒徑 0.425mm) 砂。撞擊前之原狀照片, 以 60 號石榴石為例如圖 4 所示。

3.2 線狀切槽實驗

本實驗探討項目有水刀橫移速率、切槽道數及水刀射距等三項影響因素。岩石種類與材質, 如表 3 所示, 所進行之參數變化範圍及水刀基本條件, 如表 2 所示。

(1) 水刀橫移速率之影響

橫移速率對岩石切割深度 (簡稱切深) 之影響, 如圖 12(a) 所示。當橫移速率在範圍 10mm/sec 內, 影響十分顯著; 而速率漸增則切深效果大幅降低。將橫移速率轉化為水束接觸岩石表面之時間  $t_{exp}$  (噴嘴直徑/橫移速率, 即水刀接觸岩材時間), 可得圖 12(b) 之結果。顯示接觸岩材時間若低於門檻時間值  $t_{thr}$ , 則

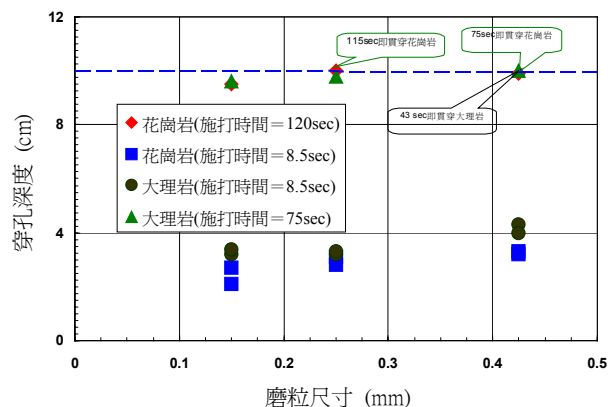
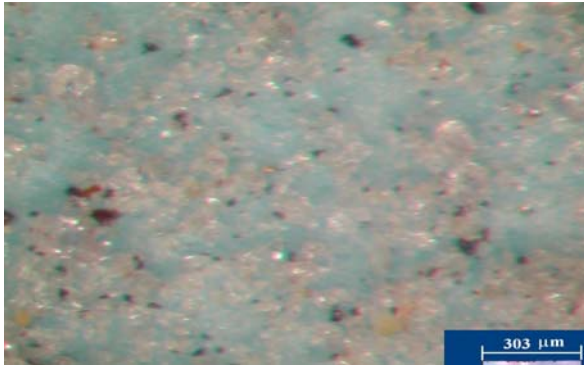


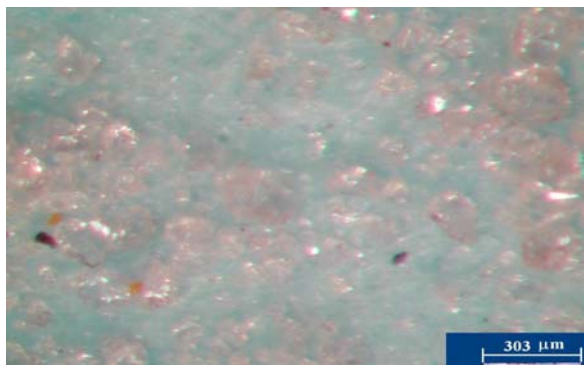
圖 11(a) 不同施打時間下之磨粒尺寸與穿孔深度關係

Fig. 11(a) Relation between abrasive size and penetration depth under various impacting times

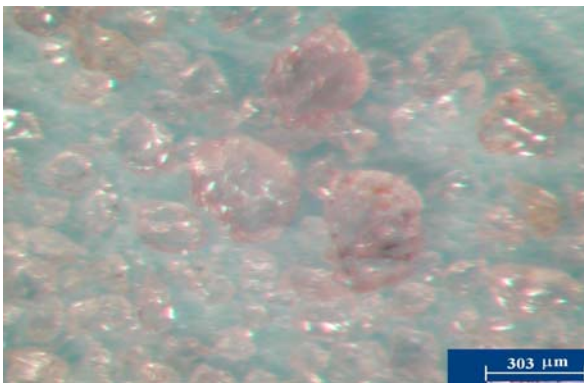




(1) 100 號石榴石之撞擊後情形  
Garnet, diameter 0.15mm



(2) 60 號石榴石之撞擊後情形  
Garnet, diameter 0.25mm



(3) 40 號石榴石之撞擊後情形  
Garnet, diameter 0.425mm

圖 11(b) 撞擊後之磨粒破碎情形 (放大 66 倍)  
Fig. 11(b) Displays of abrasive fracturing after impact (amplification factor 66)

水刀無法有效發揮切割能力。亦即橫移速率存有一門檻值  $v_{thr}$  (相對於  $t_{thr}$ )，當水刀操作之橫移速率超出此值，切割能力將大幅降低。

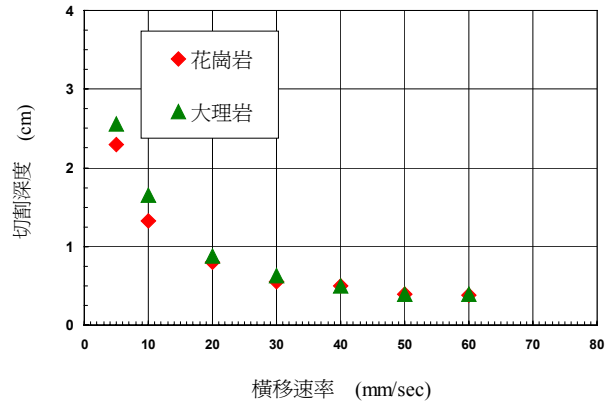


圖 12(a) 橫移速率與切割深度關係

Fig. 12(a) Relation between transverse rate and cutting depth

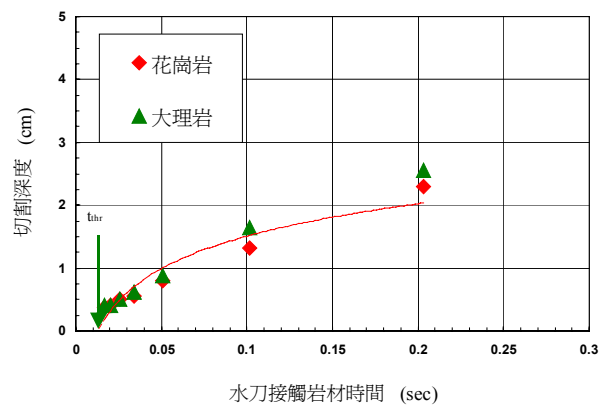


圖 12(b) 水刀接觸岩材時間與切割深度關係

Fig. 12(b) Relation between impacting time and cutting depth

(2) 切槽道數之影響

不同切槽道數 ( $N$ ) 對岩石切深之影響，如圖 13 所示。水刀切槽道數愈多所得切深愈深，惟每道切深隨道數之增加而逐漸遞減，同時水刀接觸岩石表面之距離 (即射距) 亦相對遞增，顯示切槽道數  $N$  亦存有一臨界值  $N_{cr}$ 。因此，當水刀總輸出能量相同下，水刀之橫移速率與切槽道數的搭配不同，將產生不同鑽切效果。

(3) 水刀射距之影響

水刀射距對岩石之切深影響，如圖 14 所示。當射距小於 20mm 內所得之切深約 2.5cm 左右，而大於 20mm 後即明顯下降，且所得切割寬度隨射距增加而有變大之趨勢。因此為求水刀有效且快速之鑽切作業，其水束出口處與材料之距離愈小愈佳，就本實驗條件而言，以不超過噴嘴直徑 ( $d_n$ ) 的 90 倍，方不致過度折損水刀鑽切能力。

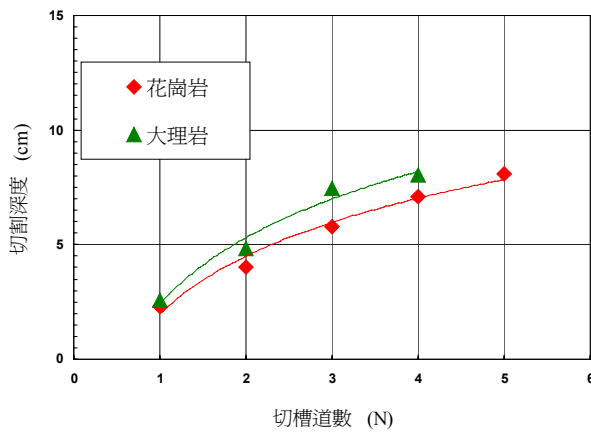


圖 13 切槽道數與切割深度關係

Fig. 13 Relation between cutting pass and cutting depth

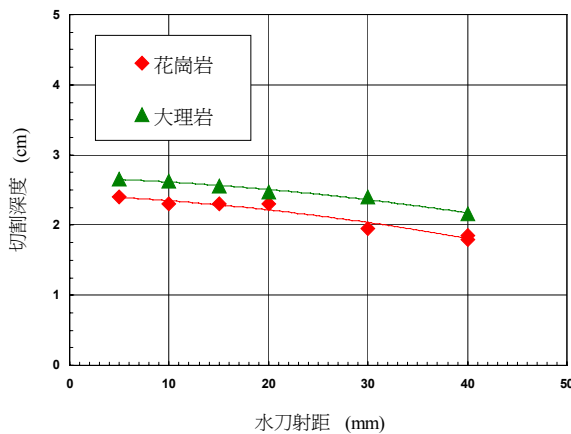


圖 14 水刀射距與切割深度關係

Fig. 14 Relation between standoff and cutting depth

#### 4. 岩石裂面形態探討

觀察加砂水刀撞擊花崗岩與大理岩的過程，並探討岩石鑽切面的形態，可得如下結果：

##### 4.1 水刀接觸岩石表面之行為

加砂水刀對岩材之移除過程係由一連串高速侵蝕磨損現象所構成，當水刀撞擊能量接近岩石破裂所需之門檻值時，即可於岩石表面的撞擊點形成初始移除，如凹孔、剝離（落）或張裂等表面形態；水刀輸出能量隨施打時間遞增時，岩石之鑽切深度亦遞增。若岩石組構含有孔隙、瑕疵或基質膠結差等不利因素，將有利於高能量水束發生竄流作用，使岩石移除深度增大；反之若岩石組構較緻密、瑕疵較少或膠結

佳時，則高能量水束將於撞擊表面產生回彈—貫入現象，形成一侵蝕、損傷與磨損等混合破壞現象。因此，水刀鑽切岩石行為除受水刀本身條件影響外，岩石組構條件如：岩石之顆粒礦物成份與含量、顆粒間之膠結來源與程度、瑕疵含量多寡與分佈、顆粒尺寸大小與幾何形狀、以及顆粒間之排列結構方式等，亦會影響水刀接觸岩石表面之行為。因此水刀對岩石表面之撞擊計有：完全回彈、部分回彈部分貫入，以及貫入等作用。

透過實驗觀察研究，加砂水刀接觸岩石行為係由撞擊、侵蝕、開裂、側向射流與剪切磨損等機制所構成的砂水混合移除現象。依據 Hashish [16] 探討加砂水刀切割材料機制顯示：材料切割面之移除機制可區分為切割磨損（頂部）與變形磨損（底部）兩類，其中切割磨損與材料硬度有關；而變形磨損與材料勁度有關。在本實驗中觀察岩石鑽切面特徵，除了切割磨損（頂部）與變形磨損（底部）外，中間存有一較大的漸變磨損區，如圖 15 所示，其中切割磨損區主要因水刀位處鑽切面的入口端，其破壞能力相對較大，因此鑽切面呈平滑狀，隨鑽切深度的遞增水刀能力將減弱，致使鑽切面由平滑狀漸變呈條痕狀的漸變磨損區，若鑽切深度持續遞增則水刀破壞能力將驟減，使鑽切面由條痕狀轉變為侵蝕溝狀的變形磨損區。



圖 15 大理岩切割面之不同階段特徵

Fig. 15 Various characteristics on marble surface cut by waterjets

### 4.2 岩石鑽切表面形態與微觀裂形

加砂水刀鑽切岩石後所得之岩石表面形態，以本實驗花崗岩與大理岩為例，如圖 16 所示。此兩類岩石之孔隙率較低，且礦物顆粒間的鍵結力佳、排列緊密，其中花崗岩之礦物含量以石英成分居多，而大理岩則以方解石成分為主，質地較軟，因此抗水刀侵蝕能力較花崗岩為低。當加砂水刀撞擊岩石表面後，因伴隨有侵蝕磨損現象，易形成貫入或切槽等情形，且移除表面入口呈平滑、規則等跡象，甚少有沿撞擊四周產生裂縫或剝落現象（見圖 2）。惟若水刀總輸出能量再進一步增加時，除岩石鑽切深度將加深外，沿撞擊中心點四周可能產生環向裂縫或剝落等現象，其範圍大小與水刀總輸出能量高低有關，且高能量水束亦可能沿此裂縫竄流而出。因此，加砂水刀鑽切此類强度高且孔隙率低之岩石，其典型表面破裂形態係以穿孔或凹槽為主，屬貫入撞擊。

經掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察鑽切表面之結果顯示：花崗岩、大理岩鑽切面所留痕跡非單一機制所形成，包含：侵蝕磨損、裂隙、沿晶與穿晶、貝殼

狀斷口、剝離 (chipping)、劈理 (cleavage) 破壞及劇烈碎 (斷) 裂等，如圖 17 與圖 18 所示，顯見其移除機制十分複雜。其中大理岩及花崗岩所造成之鑽切面微觀裂形的最大差異在於：大理岩表面有沿劈理破壞及磨粒附著，而花崗岩表面則無劈理但有磨粒嵌入，並有不同礦物顆粒間之沿晶破壞跡象，如圖 19 所示，顯示移除機制與岩石種類息息相關。

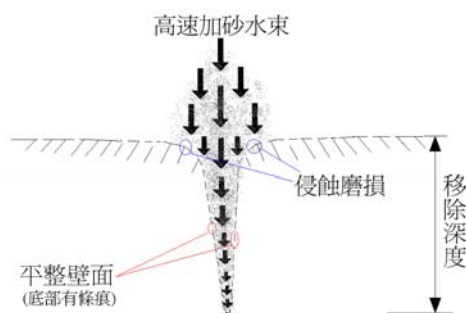
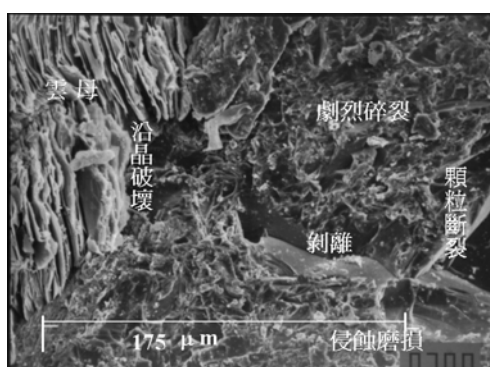
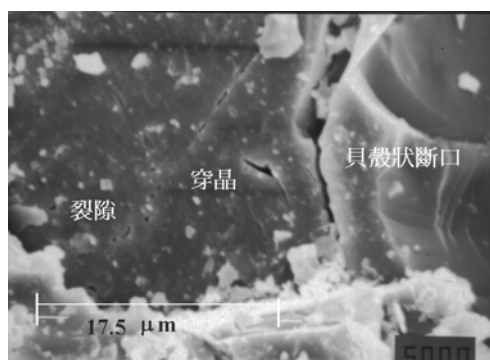


圖 16 加砂水刀鑽切岩石後之典型表面破裂形態  
Fig. 16 Sketch on rocks surface fractured by abrasive waterjets

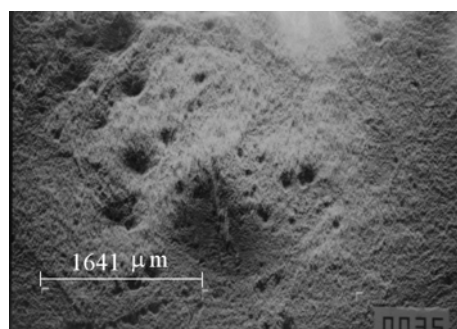


(1) 不同礦物顆粒之表面破裂情形  
Surface fracturing of various mineral grain

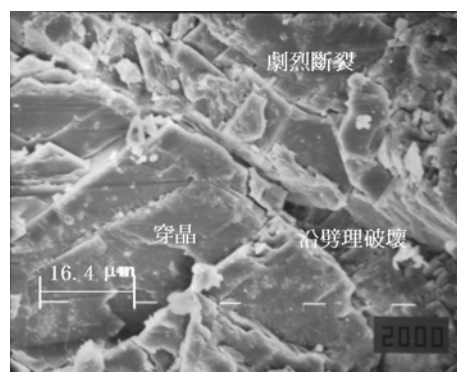


(2) 礦物顆粒之表面破裂情形  
Surface fracturing of mineral grain

圖 17 花崗岩於加砂水刀作用下之表面微觀形態  
Fig. 17 Microscopic inspection on fracturing surface of granite cutting with abrasive waterjets

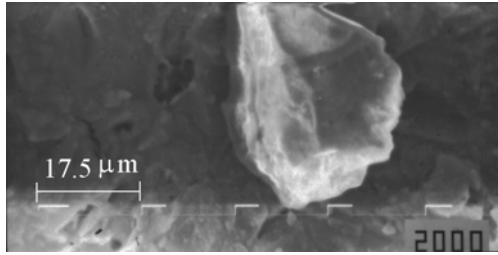


(1) 表面侵蝕 (凹洞) 情形  
Erosion of grain surface (indent)



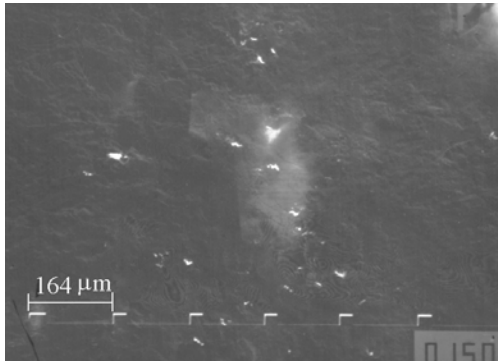
(2) 劈理、穿晶及碎裂等情形  
Cleavage, transgranular and fractured on grain surface

圖 18 大理岩於加砂水刀作用下之表面微觀形態  
Fig. 18 Microscopic inspection on fracturing surface of marble cutting with abrasive waterjets



(1) 石榴石嵌入花崗岩切割面

Garnet embedded into fracturing surface of granite



(2) 磨粒附著大理岩切割面情形 (亮點以背向散射電子法得)

Garnet stuck into fracturing surface of marble (BEi)

### 圖 19 磨粒於岩石切割面之不同型態

Fig. 19 Illustrations of different damage patterns of rock cutting with abrasive waterjets

## 5. 結 論

本文以加砂水刀進行一系列的鑽切花崗岩與大理岩之室內實驗，除探討其鑽切岩石能力之影響因素與行為外，並透過實驗後所得岩石切割面進行掃描式電子顯微鏡觀察，以瞭解鑽切面之形態變化與差異。綜合本文之研究結果，可獲致下列結論：

- (1) 鑽切岩石能力之影響參數主要為：水刀壓力、流量、施打時間或橫移速率、切槽道數及磨粒流率。其中水刀壓力、施打時間、橫移速率及磨粒流率等參數對鑽切深度影響較大，且呈非線性相關。
- (2) 高速水束中混入磨粒後，可有效提昇水刀鑽切能力。且為達有效之鑽切作業，實驗條件中存有兩項關鍵參數，即水刀壓力應超出門檻壓力，以及操作參數（橫移速率、射距、磨粒含量比等）不宜超出其臨界值。
- (3) 岩石單壓強度愈大，水刀穿孔所需之門檻壓力愈高，依實驗所得之門檻壓力值約為岩石單壓強度的 0.05 倍，約與岩石的抗張強度接近。

- (4) 混砂管徑、磨粒含量比及磨粒尺寸間的關係，存有一最佳化組合，方得發揮水刀最大的鑽切能力。依據本研究之基本參考實驗組條件而言，當磨粒含量比分別採 25% 及 16.73% 時，混砂管徑與磨粒尺寸之比依序採 4.1 與 2.4，即可發揮水刀鑽切的最高能力。
- (5) 岩石鑽切行為深受水刀條件及岩石組構條件所影響，經研究知岩石表面的撞擊有：完全回彈、部分回彈部分貫入以及貫入等作用，係由撞擊、侵蝕、開裂、側向射流與剪切磨損等機制所構成的砂水混合移除現象。
- (6) 本研究中，花崗岩及大理岩之典型表面破裂形態以穿孔或凹槽為主。而岩石切割面的特徵可區分為：切割磨損區、漸變磨損區及變形磨損區，其中切割磨損區呈平滑狀，漸變磨損區呈條痕狀，變形磨損區呈侵蝕溝狀。經岩石切割面的微觀觀察顯示：大理岩表面有沿劈理破壞及磨粒附著，而花崗岩表面則無劈理但有磨粒嵌入，且有不同礦物顆粒間之沿晶破壞跡象，顯示移除機制與岩石種類息息相關。

## 參考文獻

- [1] 鄭富書、黃燦輝，「隧道開挖技術研發—水刀工法研發」，榮民工程股份有限公司專題研究計劃報告，民國 88 年。
- [2] F. P. Bowden and J. H. Brunton, "The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds," *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 263, 1961, pp. 433-450.
- [3] M. Hashish, "Steel cutting with abrasive water jets," *Proceedings of the 6th Inter. Symp. on Jet Cutting Tech.*, Cranfield, UK, 1982, pp. 465-488.
- [4] M. Hashish, "A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 106, 1984, pp. 88-100.
- [5] M. Hashish, "Visualization of the abrasive-waterjet cutting process," *Experimental Mechanics*, June, 1988, pp. 159-169.
- [6] J. Zeng and T. J. Kim, "An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting," *Wear*, Vol. 193, 1996, pp. 207-217.
- [7] A. W. Momber and R. Kovacevic, "Test parameter analysis in abrasive water jet cutting of rocklike materials," *International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 34, No. 1, 1997a, pp. 17-25.

- [8] M. Curbach and J. Eibl, "Crack velocity in concrete," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, 1990, pp. 321–326.
- [9] X. Li, J. Wang, Y. Lu, Y. Lin, H. Kang and J. Sun, "Experimental investigation of hard rock cutting with collimated abrasive-water jets," *International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 37, 2000, pp. 1143–1148.
- [10] U. H. Mohaupt and D. Burns, "Machining unreinforced polymers with high velocity water jets," *Experimental Mechanics*, Vol. 14, 1974, pp. 152–157.
- [11] A. W. Momber and R. Kovacevic, *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer, Dallas Texas, 1997b, pp. 34–40.
- [12] 黃三林, 「低功率水刀切割岩石能力探討」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文, 2000 年。
- [13] G. Rehbinder, "Slot cutting in rock with a high speed water jet," *International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 14, 1977, pp. 229–234.
- [14] G. Rehbinder, "A theory about cutting rock with a water jet," *Rock Mechanics*, Vol. 12, 1980, pp. 247–257.
- [15] G. Rehbinder, "The relation between the uniaxial tensile strength and the sample size for bohuse granite," *Rock Mechanics*, Vol. 10, 1978, pp. 201–219.
- [16] M. Hashish, "Material properties in abrasive-waterjet machining," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Ind.*, Vol. 117, 1995, pp. 578–583.



**鄭品聰 (Piin-Tsung Cheng)** 台灣省高雄縣人，民國 51 年生。現為國立台灣大學土木工程學研究所大地工程組博士班研究生，主要興趣研究為水刀、岩石力學。



**黃燦輝 (Tsan-Hwei Huang)** 民國 41 年生，國立台灣大學土木工程學系教授。台大土木研究所博士。研究領域為隧道工程、岩石力學與工程。



**鄭富書 (Fu-Shu Jeng)** 民國 49 年生，國立台灣大學土木工程學系副教授。台大土木系學士、碩士、美國麻省理工學院博士。研究領域為大地工程、岩石工程、地質力學、隧道工程。

---

收稿日期 91 年 8 月 14 日、修訂日期 91 年 8 月 28 日、接受日期 91 年 9 月 19 日  
Manuscript received August 14, 2002, revised August 28, 2002, accepted September 19, 2002