

科技新知

水刀於大地工程應用與展望

鄭富書*

水刀自 1960 年代開始商業化後，在持續研發下水刀能力大幅提昇；目前水刀輸出功率已由早期的 10kW 提昇至 270kW 或更高，約為當年翡翠水壩工程所採用之水刀輸出功率的 10 倍左右。水刀在大地工程方面所能提供之潛力，亦相形增加。國內最近已針對水刀在軟岩開挖之應用，進行一系列的評估與現場實作，獲得初步成果。本文主要針對水刀的基本原理、水刀在大地工程上應用實況及水刀對軟岩開挖實驗測試之結果，進行一摘要報導。

一、水刀之基本原理

水刀為利用高壓水柱，撞擊工作物表面，使材料產生破壞，而達切割、清除或破裂之目的。水刀之基本原理是將水由低壓抽水幫浦輸入增壓器(intensifier)中，經過增壓處理後將低壓水轉為高壓水，經噴嘴噴射而出，產生的高速水柱撞擊工作表面達到切削效果。水刀設備的基本配置包括：給水系統、集水器、幫浦、增壓器、噴嘴、加砂裝置以及控制器等。

純水水刀不能切削高韌度之材料，如金屬。此時，水刀之水流中可加入高硬度之磨料(abrasive)，形成「加砂水刀」，利用磨料對欲切削材料之磨蝕，達成切削之目的。加砂水刀之加砂方法有兩種方式，一種為磨粒在水柱射出時才混入；另一為磨粒在水柱射出前就先混入。

水刀用途，依其作用機制，可區分為(如表一所示)：(1)切割材料(hydro-cutting)；(2)破裂材料(hydro-demolition)；(3)表面處理(hydro-milling 或 surface preparation)；以及(3)爆破(hydro-blasting)。

水刀輸出能力，主要參數有二項：壓力及能量。水刀的流量、壓力及能量之關係為：

$$\text{輸出能量(kW)} = \text{壓力(psi)} \times \text{流量(gpm)} / 2300$$

或

$$\text{輸出能量(kW)} = \text{壓力(MPa)} \times \text{流量(L/min)} / 60$$

表一 水刀之用途種類及典型參數值

用途	典型壓力 (MPa)	典型流量 (L/min)	輸出能量 (kW)	備註
切割	240~420	~22	~90	
破裂	80~100	~160	~270	
表面處理	~50	~80	~70	(手持水刀)

供切割用途之水刀，出噴嘴時之流速可達每秒數百公尺，其流量每分鐘流量約廿公升；壓力約為 240 MPa，亦有高壓力(~420 MPa)，或超高壓力(~1000 MPa)。一般而言，壓力愈高以及噴射水柱愈細，水刀所切削的品質愈細緻且精準。

水刀破裂之壓力較水刀切割為低(約 80~100 MPa)，但其流量極大(約 160 L/min)，同時其輸出能量也較水刀切割為大(~270 kW)。在此大流量時之水束，可對射流附近之材料造成「微破裂」，有助於擴大水刀的影響範圍及破裂效率；此

種水刀所切出之切槽較大且其表面可能較為粗糙。此種水刀可用於大範圍之混凝土剝除作業。亦即，如欲進行精密切割，宜用高壓低流量之「切割水刀」；如欲進行大範圍且快速之材料破裂，則可採用「破裂水刀」。當然，如果水刀能同時具有高壓、高流量之能力，則可同時具「切割」與「破裂」之功能，惟機械設備之輸出功率大增，相對成本亦隨之增加。

水刀表面處理，包括：鍋爐內垢、鐵銹、油漆之清除、金屬表面之打毛處理等。依其目的之不同，有可用手持之低壓低流量水刀至較高能量之水刀(不可手持)。國內目前有採用「破裂水刀」進行大面積之橋面混凝土剝除，亦屬於表面處理工作，習稱之為「水銑」。

二、水刀之特性與用途

用於切割之水刀具有下列特性：(1) 水刀為非接觸式切削，且可切削尖角；(2) 水束直徑很小，切割錐度可小於 0.5mm ，適於線切割；可配合電腦控制，切割出複雜圖案。(3) 加砂水刀具有高切削能力，幾乎能切割任何堅硬材料；切割深度亦大，可切穿 30cm 厚玻璃；(4) 水刀屬於冷切削，切削溫度約為 $40\sim 80^\circ\text{C}$ ，相對於傳統切削製程，不需使用熱處理或二次切削去除熱影響區。故對於某些怕熱材料如塑膠等，水刀具有難以取代的優點。

因此水刀切割於實際產業的應用非常廣泛，涵蓋了太空、國防、汽車、建材業、石材業、用過即丟產品製造業、電子及電腦產業、食品加工業及玻璃工業等產業，甚至包括核能電場的污染清理及停止運轉後之善後工作。

水刀破裂在土木工程的典型應用為混凝土的剝除，主要為高速公路、橋樑或隧道之養護維修或切割鋼筋混凝土。水銑主要是用於清除公路橋樑、停車場及其它鋼筋混凝土建築物上劣化的混凝土。其操作壓力一般為 70 到 100MPa 之間。水銑具有快速、工時短之優點。同時水銑尚具下列特性：(1)可以選擇性破除劣質混凝土，而留下良好的混凝土；(2)氣鑽會造成混凝土內部之微裂縫，而水銑則不會；(3)更好的鋼筋 - 水銑系統的水壓可以調整到用來切除混凝土，去除鋼筋上的鏽而不傷及鋼筋，故在鋼筋露出後即鋪上一層新的混凝土，不需要第二道作業；(4)相對於氣鑽，水銑之震動、噪音及粉塵較少，降低對環境上的衝擊。

水刀亦有其應用上的限制。雖然目前商用系統壓力可達 1000MPa ，但當水壓超過 410MPa 時，管路元件的價格將大幅提高，故一般僅在 400MPa 以下操作，從而限制了水刀對工件的貫穿能力。再者，混砂管的壽命不長；目前混砂管壽命約 $20\sim 100$ 小時，混砂管壽命短，不僅增加機具停機時間，影響生產力，同時也使切削效果不穩定。加砂水刀的另一個技術難題是磨粒供給速率不易控制，故切削品質難以提升。在自動化方面，高能水束需由一收集器吸收其能量。此水束收集器會對噴頭位置及其所指之方向造成限制。

三、水刀在大地工程之應用

3.1 岩盤打樁輔助

當打樁時(如鋼軌樁)遇岩盤時，常有難以貫入之困難；本工法在樁前端加設水刀頭，利用水刀擊碎岩石，以協助樁貫入

岩盤中；同時，水刀所釋出之水尚可沖出岩屑，有助於樁尖持續貫入岩盤。

3.2 土壤改良

土壤改良時，如採用化學灌漿法，早期有灌漿不均勻之缺陷，致使無法控制改良後土體的一致性。在 1970 年代初期，發展出兩種方法改進上述問題：第一種為利用高壓(200bars)的噴漿(包括水泥漿)將土壤切割混合；第二種為利用水刀及噴漿，水刀用來切割土壤，噴漿用來攪拌土壤。因為固定能量下，切割軟土層較硬土層更容易，並根據土壤的性質，上述所提方法均會產生不同切割直徑之土壤的缺點。1994 年出現了雙水刀工法解決了上述問題。為提高土壤改良的效率，陸續有結合機械刀頭的機具產生，將雙水刀跟機械刀結合，以達充份拌合之效果。

3.3 岩石切割

在以前，切割堅硬岩石，常導致鑽頭過於損耗，引起增溫，震動，造成切割阻力的增加，以及塵土的產生。現在由試驗證明，若採用水刀輔助切割工具，可以減少上述負作用，並提昇岩石作業性質的範圍。

3.4 清洗岩縫

水刀科技曾於民國七十年在翡翠水庫施工時有著相當的貢獻。當時水庫的壩基內有幾處的岩縫，岩縫有大有小，小至 2cm，大至 20cm；其中夾雜著一些黏土、風化的岩石碎片等。由於有這些岩縫會導致壩基的強度降低，因此利用水刀將岩縫中的軟弱材料去除並清洗乾淨，再重新回填灌漿。視目的之不同，水刀之壓力為 20 及 240MPa，流量為 105L/min 及 11L/min。

四、水刀應用之拓展 — 軟岩開挖

隧道工程中若使用炸藥開挖，不可避免的會對隧道周圍岩盤造成損傷；在軟弱岩盤中開挖，由於岩性原屬軟弱，岩石損傷後對隧道之穩定更不利。如果在軟弱岩盤中使用機械開挖，雖較不會傷及周圍岩體，但由於台灣地質構造複雜，岩性相當不均質，遭遇中強岩石，又力不從心之困境。如果機械開挖工具能配合水刀使用，則上述困境將可解決。在軟弱岩盤水刀之開挖則更具效果，且可先行對隧道外圍鑽孔處切製預裂縫，使岩石開炸時隧道周圍岩體之損傷更少。

使用水刀於隧道開挖，有下列之優點：(1) 減少粉塵；(2) 快速；(3) 遭遇強岩盤不必申請炸藥；(4) 機動性強可快速移動；(5) 水壓耗損少可使輸壓管線延長；(6) 可接駁至不同之動力系統；(7) 精確施工；(8) 用途廣泛，同一機具可用於不同場合；(9) 經濟性高，平時耗損及維護費低。因此，水刀技術應用於國內外隧道工程作業，極具開發價值。

國內在國科會公共工程科技研究之支持下，進行了一系列測試實驗，以評估水刀應用於軟岩開挖之可行性。採用之水刀為破裂水刀，最大輸出功率為 270kW，最大壓力為 100MPa，最大流量為 160L/min。

初步之成果如下：

1. 南港砂岩邊坡現地開挖

所測試之南港砂岩強度約 30MPa。在噴嘴固定不動的情況下，最大開挖深度約為 2m。其開挖速率大於 0.25m³/min，如

果水刀之周邊設備再加改善，此開挖速率當可大幅提昇。搖動噴嘴開挖之岩碴頗小，有利於出碴作業。

2.不同岩塊破裂實驗

採用不同岩塊，如表二所示；其單壓強度範圍界於 30 MPa ~ 162 MPa。

表二 各種測試岩石之單壓強度

岩石種類	平均硬度指數	單壓強度(MPa)
變質砂岩	42.5	148±18.9%
砂岩	16	30±16.7%
安山岩	35.5	162±12.0%
大理岩	24.3	73±5.7%
花崗岩	34.8	156±0.06%

實驗結果顯示，水刀可破裂所列之岩塊。其中在安山岩及變質砂岩，除了穿孔之外，尚造成表面之剝裂。

變質砂岩邊坡現地開挖 – 目前水刀雖可破裂變質砂岩之岩塊，惟尚無法開挖

變質砂岩之邊坡。其原因在於變質砂岩塊之周圍束制不足，致水刀所造成之張力，可以開裂岩塊。而現地之邊坡岩體，其周圍束制良好，此時水刀所造成之張應力不足造成破壞；同時，水刀壓力小於岩石壓力強度，不足以造成穿孔。是故，水刀無法造成有效破壞。

總結而言，依目前所用之水刀能力(功率)，可開挖單壓強度至60MPa之岩體；可以破裂單壓強度至160MPa之單獨岩塊。如欲開挖高強度(如160MPa)之岩體，尚須進一步之研發。可能之方向有二：(1)提高水力之功率與壓力；(2)先以高壓水刀切槽，解除岩塊之側向束制，然後用低壓水刀進行破裂。

經水刀試作實驗得知水刀未來對軟岩的開挖，存有可能之應用空間，值得進一步探討；目前除了台灣之外，國外包括瑞典與日本，亦對此應用有高度之興趣，在不久的未來如出現水刀開挖機，並不意外。