

音射式孔內探測儀於地質探查與岩心比對之應用

鍾明劍¹ 許世孟¹ 顧承宇² 譚志豪¹ 冀樹勇³

- 1.財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心研究員
- 2.財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員兼組長
- 3.財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員兼經理

摘 要

以往的地質探查多藉由檢視鑽孔岩心以統計弱面分佈與位態狀況，但此種方式尚存在許多限制，諸如：(1)當岩心破碎或無法提取時，無法了解地下地質狀況；(2)不易或無法判斷岩心顯示之弱面為原生或因鑽取破裂引致；(3)對於空穴、弱面內寬、易流失之夾心等情形，不易透過岩心檢視得知；(4)無法檢視岩心箱內鑽孔岩心是否放對位置等問題。因此，近年來許多工程師逐漸重視以孔內攝影(Borehole Imaging)技術應用於地質探查，本文即以曾文越域引水工程計畫為例，說明於山岳地區地下水文地質特性調查時，如何採用音射式孔內探測儀進行地質探查與岩心比對。文中所介紹之音射式孔內探測儀(High Resolution Acoustic Televiewer)係採用固定式超音波發射源及旋轉反射鏡系統，藉由擷取音射訊號撞擊鑽孔孔壁之走時及反射訊號振幅，以判斷弱面位態及岩層狀況，具有解析度高、穿透能力強、適用於鑽孔中充滿混濁水環境等優點。此外，本系統具有強大的後處理能力，根據攝錄影像除能計算弱面或構造的深度與位態外，並可進行弱面統計、立體投影分析與鑽孔變形預測等功能，為工程師提供豐富的工程地質資料。

關鍵字：音射式孔內探測儀、地質探查、岩心比對。

CASE STUDIES OF HIGH RESOLUTION ACOUSTIC TELEVIEWER FOR GEOTECHNICAL EXPLORATION AND CORE SAMPLE CORRECTION

ABSTRACT

This paper presents a high resolution acoustic televiewer for borehole imaging, fracture investigation, and core sample correction from several case studies in south Taiwan. The acoustic televiewer uses a fixed transducer and rotating mirror system to acquire the reflected acoustic amplitude and travel-time. Based on the amplitude and travel-time, geologic features including fractures, gouges, and veins could be identified, and the strikes and dips of geologic features could also be obtained. Further fracture analysis aims to identify geometric sets of fractures, and then estimate variations in mean-dip and frequency within the sets and lines of intersection among the sets. One of the useful functions of the acoustic televiewer is the output of breakout log which predicts the possible deformation and collapse of borehole walls. In addition, imaging of the borehole wall provides useful information for the collection and interpretation of core samples, for example, corresponding position of core sample, drilling-induced weakness. Preliminary results obtained showed that abundant geologic information can be acquired from the borehole imaging using the high resolution acoustic televiewer.

Key Words: high resolution acoustic televiewer, geotechnical exploration, core sample correction.

一、前言

台灣地區因雨量充沛，且位於歐亞板塊與菲律賓板塊交接處，活躍的造山運動造成岩層之破碎度高而節理發達，故地表水易沿地質弱面滲入岩層，以致岩盤中之地下水儲量豐富。近年來山岳隧道之開挖經驗

顯示，穿過高山地形之長隧道因水文地質條件十分複雜，隧道施工時除因大量湧水而肇生災害並導致工程進度延宕外[1-3]，亦常因地下水流失引發鄰近區域環境水文地質之爭議[4]。有鑑於此，於規劃、設計及施工階段之隧道開挖湧水分析顯得格外的重要，然而此類分析模式的水文地質參數又仰賴適當的水文地質

特性調查，唯有結合上述工作，方有利於水文地質模式在預測隧道可能湧水量與鄰近地下水流場之準確度，以降低隧道工程施工風險，避免不必要工程湧水災害。

山岳地區地下水文地質特性調查主要在調查裂隙岩體的水文地質特性參數，藉此瞭解裂隙岩體之水力特性，由於裂隙岩體本身存在許多複雜構造及岩性差異，導致所對應的水力特性也隨之不同。為瞭解山岳地區內岩層的地質構造分佈，本文建議地質鑽孔可配合進行孔內攝影調查，以此進行節理及裂隙分佈之孔內攝影記錄，可進一步的研判岩層狀況、量測鑽孔內節理及裂隙分佈及位態等資料。

本文將以曾文越域引水工程計畫為例，說明於山岳地區地下水文地質特性調查時，如何採用音射式孔內探測儀進行地質探查與岩心比對。

二、工程概述

2.1 案例背景

台灣降雨豐沛，年平均雨量約 2500mm，雨水滲至含水層蓄積，形成豐富的地下水水資源。惟降雨量時空分配不均，山區降雨可高達 4900mm/year，平原區則不足 1200mm/year，每年 5 至 10 月降雨量約占全年總降雨量 80%。豐枯水期比例又與區域特性有關，北部雨量豐枯比約 6:4，但南部地區則達 9:1[5]。為平衡此一水資源分配不平衡之狀況，許多蓄水及引水之水利建設陸續規劃展開。本研究案例即為台灣南部正在進行之曾文水庫越域引水隧道興建案例，期能藉以改善區域水資源分配不均的問題。

曾文水庫越域引水隧道係將荖濃溪豐水期餘水，透過引水隧道橫越荖濃溪、旗山溪及草蘭溪流域，引至曾文水庫內蓄積。工程完成後預計可增加台灣南部地區每日 60 萬噸供水。越域引水隧道區分為東、西兩段，東隧道貫穿荖濃溪流域與旗山溪流域，長度 9.6km；西隧道則貫穿旗山溪流域與草蘭溪流

域，長度 4.3km。東、西隧道之坡度皆為 1/700，藉由重力流動方式達到越域引水之目的[6]。

2.2 地層與地質構造調查

隧道沿線通過之主要岩層有：三民頁岩、紅花子層及長枝坑層等中新世沉積岩層，岩性以砂岩、頁岩及兩者之互層為主。隧道穿越之地質構造甚多，主要為一系列東傾且走向近乎平行之逆斷層及褶皺，這些斷層及褶皺常形成局部的破碎帶，包括：荖濃斷層、高中斷層、老人溪背斜、老人溪向斜、旗山斷層、小林向斜、平溪斷層及表湖斷層等地質構造，圖 1 為隧道軸線位置之地質剖面圖，其中東隧道沿線岩覆最高達 1300m[7]。

2.3 試驗場址描述

本計畫係以位於西隧道的兩孔長距離鑽孔(鑽孔編號分別為 HB-95-01 與 HB-95-02)進行孔內攝影調查，以充實西引水隧道之相關水文地質參數資料。根據本工程先期作業階段所建立之引水隧道沿線水文地質剖面圖(見圖 1)可知，HB-95-01 號孔(以下簡稱 1 號孔)場址位處小林向斜之西翼，接近表湖斷層，其地層由上至下則分屬紅花子層(MH-M)與三民頁岩(ML)，依據岩心紀錄可知，岩性主要為灰色細砂岩及灰黑色泥岩。由岩心資料可研判此地層曾受剪裂帶錯動或擠壓，導致地層內形成多處剪裂泥夾砂岩與泥岩角礫之破碎帶，此現象亦導致鑽孔過程中，曾數次遭遇坍孔或孔壁不穩定之問題。

HB-95-02 號孔(以下簡稱 2 號孔)場址所處地層屬長枝坑層-砂頁岩互層(M)，依據岩心紀錄可知，岩性主要為灰色砂岩及灰黑色砂質泥岩。此地層於地表至地下 150m 左右多以砂岩為主，偶與灰黑色砂質泥岩形成互層，150m 以下則以灰色砂岩與灰黑色砂質泥岩薄互層為主，雖多有局部稍破碎或破碎區段，惟由岩心仍可研判其屬較緻密之地層。

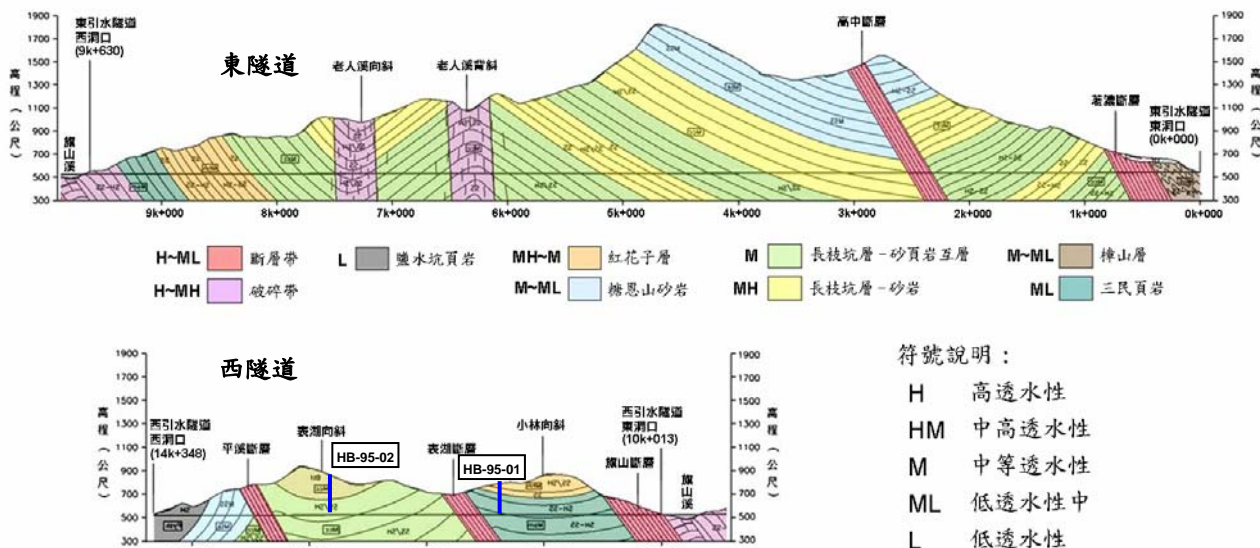


圖 1 隧道軸線位置之地質剖面圖

三、孔內攝影調查

本計畫雖可藉由檢視鑽孔岩心，以統計弱面分佈、位態狀況等。但根據岩心調查弱面尚存在許多限

制，諸如：(1)當岩心破碎或無法提取時，無法了解地下地質狀況；(2)不易或無法判斷岩心顯示之弱面為原生或因鑽取破裂引致；(3)對於空穴、弱面內寬、易流失之夾心等情形，不易透過岩心檢視得知；(4)無法檢

視岩心箱內鑽孔岩心是否放對位置等問題。因此，近年來許多工程師逐漸重視以孔內攝影調查技術應用於地質探查。

孔內攝影調查係於鑽孔中置入一攝影設備，直接攝錄孔壁情形，以即時研判地層狀況、節理及裂隙分佈及位態等資料。其設備機型大致可分為兩種型式：光學式和音射式，光學式設備為一般孔內攝影所常用，主要由一組光源及一架攝影機所構成，其拍攝結果如同一般肉眼所見，精度則取決於攝影機之解析度。惟其最大之缺點在於若孔內有水時，水質不可混濁，以免影響攝影品質。

然而在台灣地區，由於地質脆弱、地下水位高，一般鑽孔為維持孔內穩定，常於孔中充滿穩定液，不利於光學式孔內攝影之使用；相對而言，音射式孔內攝影則無此限制。音射式孔內攝影以超音波為發射訊號，而非一般可見光，藉由反射訊號之強弱及走時來判讀地層狀況。由於其具有解析度高，可適應多種環境等優點，因此於本計畫中採用，茲分述孔內攝影調查之試驗設備與探測步驟如后。

3.1 試驗設備

針對本計畫之音射式孔內探測儀系統，主要設備及功能說明如下。

(1) 音射探測儀

音射探測儀為本系統之訊號產生及接收器，訊號源為超音波，如圖 2 所示。探測儀直徑為 45mm，適用孔徑為 55–200mm，溫度範圍為 -20–70°C，最大抗壓力為 20MPa。圖 2 中探測儀上方弓型彈簧為中心器，可確保探測儀位於鑽孔中心，避免偏心導致量測訊號失真。此外，探測儀上可以外掛其他地球物理探測儀器，增加更多的量測項目。

(2) 捲揚系統

主要將探測儀置入擬試驗區段，包括絞車、三角架、滑輪及吊頭(如圖 3 所示)。本系統之試驗深度可達 600m，速度為 00–20m/min。此外，三角架上之滑輪附有計數器，用以記錄探測儀所在深度，量測之精度可達 1mm。

(3) 記錄器

為一自動資料收集處理器，可與電腦直接連線。

(4) 電腦及軟體

包含一筆記型電腦及影像處理軟體 RGLDIP。RGLDIP 可記錄、處理、分析探測儀所得影像。其具有人工和自動識別選擇等功能，可自動計算弱面、構造之位態(走向/傾角和寬度)，並進一步繪製立體投影圖，弱面方位頻率圖以及可與實際岩心資料相對比的「模擬岩心」資料。

3.2 探測步驟

本系統試驗步驟相當簡單、迅速，孔內探測試驗步驟如下：

- (1) 於試驗場址組立本系統如圖 4 所示。
- (2) 吊放探測儀至待測深度後，以低速(約 1–1.5 m/min)下降開始進行掃描，至量測區段底部後，以低速上升再掃描一次，作為複核。

- (3) 將孔內探查擷取的訊號轉換成於螢幕上顯示之孔壁影像，並建立起隨深度變化之鑽孔圖像(256 色階)如圖 5 所示。圖中暗色的正弦軌跡影即為弱面。所擷取影像需進一步處理，以作後續分析之用。

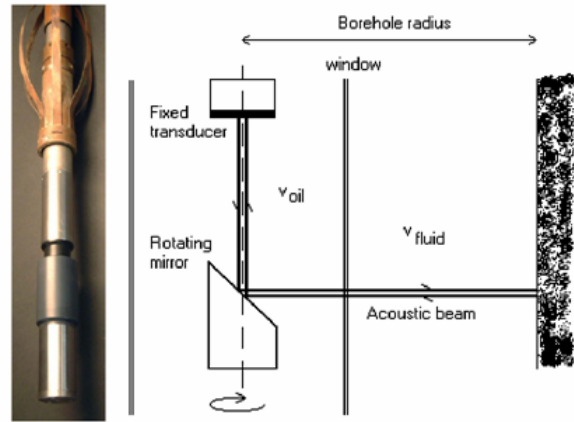


圖 2 音射式孔內探測儀



圖 3 捲揚系統(含絞車、三角架、滑輪及吊頭)

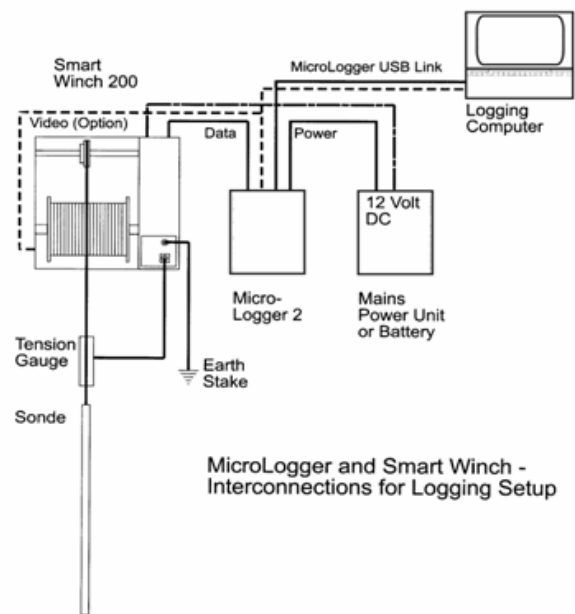


圖 4 系統組立圖

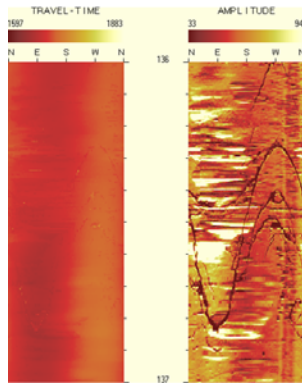


圖 5 探測所得之鑽孔圖像

四、影像處理與成果分析

經由音射探測儀所擷取之影像，在進行弱面統計分析之前，首先需進行影像處理以確保資料之可靠度。影像處理流程包含磁性異常區域判斷及修正、鑽孔軸偏角修正、振幅影像偏心化修正等，待完成上述三項影像處理修正後，可進一步進行影像分析，包括：(1)地質構造判斷及標示；(2)弱面深度分佈情形；(3)立體投影統計及分析；(4)孔內攝影影像與鑽孔岩心之比對等項目，茲分述如后。

4.1 地質構造判斷及標示

當一個平面型弱面與鑽孔斜交時，所呈現的影像為一正弦軌跡。以垂直鑽孔為例，可將此正弦軌跡表示如式(1)。

$$z = depth + \rho \sin(x - \phi) \quad (1)$$

上式中存在 3 個待定參數分別為深度(Depth)，振幅 ρ 及相位角 ϕ ，其中深度用以決定弱面所在之鑽孔深度；振幅 ρ 反應弱面傾角，當傾角愈大，振幅 ρ 愈大。水平弱面之振幅為零，垂直弱面之振幅為無限大。相位角 ϕ 則代表弱面之方位角，以正北方為零度，順時針方向增加。根據上述表示式，即可藉由標示影像中之正弦軌跡，反推求得弱面位態資料。對於地質構造的判斷及標示，影像處理軟體 RGLDIP 提供全自動、半自動、以及手動等判斷方法，據此逐一進行整個鑽孔的弱面判釋工作。

4.2 弱面深度分佈情形

完成上述地質構造判釋後，RGLDIP 軟體可自動由判釋結果計算弱面、構造之深度及位態。於分析結果中，使用者並可自行加上註解如層面、不整合面、開口裂隙等資訊，如圖 6 所示。圖中由左至右依序顯示了鑽孔柱狀圖、鑽孔展開影像、弱面位態向量圖、弱面位態圖、弱面描述等，詳細反應鑽孔中工程地質資料。另外，當弱面呈現不連續或含有礦脈、夾泥時，RGLDIP 軟體亦提供額外功能，以標示特殊情況。在此次試驗成果的判釋過程中即可發現部份區段(如 2 號孔，深度 113.3m 處)存在剪裂泥，如圖 7 所示。

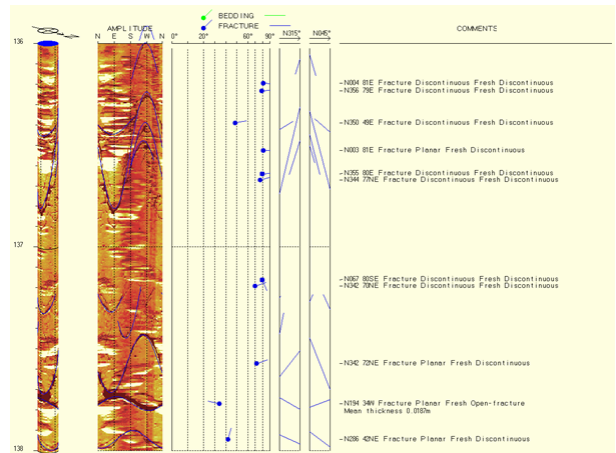


圖 6 弱面位態分析結果(1 號孔，深度：136—138m)

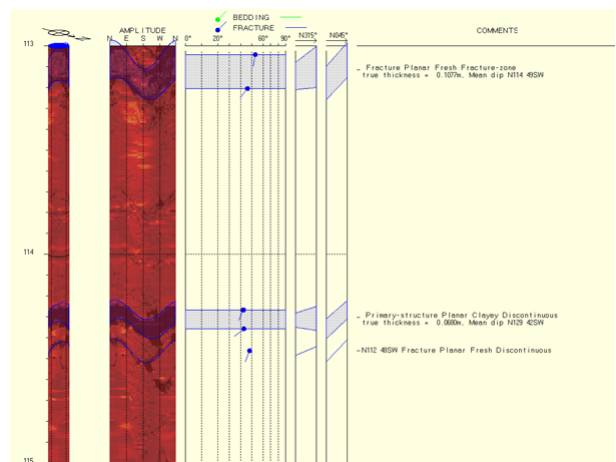


圖 7 剪裂泥量測結果(2 號孔，深度：113—115m)

由於 1 號及 2 號孔之表層較為破碎，基於坍塌考量，則將套管分別套至地表下 80.0m 及 76.2m。進行孔內攝影調查時，由於 1 號孔之地下水位約在 88.2m 處，且 146.1m 處之孔壁向內擠壓，致使孔內探測儀無法往下吊放，因此 1 號孔實際有效攝影範圍為 88.2—146.0m。在 1 號孔分析中，實際有效攝影範圍內共量測得 150 道地質弱面，弱面隨深度之分佈情形整理如表 1 所示。2 號孔之地下水位約在 57.7m 處，高於套管深度(76.2m)，因此 2 號孔實際有效攝影範圍為 76.2—345.0m。在 2 號孔分析中，實際有效攝影範圍內共量測得 261 道地質弱面，弱面隨深度之分佈情形整理如表 2 所示。

表 1 1 號孔弱面分佈狀況

深度 (m)	岩性描述	弱面數量
88.20—101.90	灰黑色砂質泥岩，層裡不明顯，破碎	38
101.90—118.85	灰色泥質砂岩，岩心大體上完整，具生物擾動現象	33
118.85—141.80	灰白色至灰色細粒砂岩，局部破碎，具生物擾動現象	67
141.80—144.20	灰色泥質砂岩	3
144.20—146.00	灰黑色砂質泥岩，偶夾薄層砂岩	9

表 2 2 號孔弱面分佈狀況

深度 (m)	岩性描述	弱面數量
76.20—110.00	灰色至灰白色細粒砂岩，具生物擾動現象，局部偶夾灰黑色砂質泥岩薄層或紋層，局部稍破碎	11
110.00—148.65	灰色砂岩與灰黑色砂質泥岩互層，砂岩為主，局部為薄葉互層或紋層，偶夾較厚灰白色砂岩層(數十公分至約3公尺)，局部破碎	45
148.65—194.00	灰色砂岩與灰黑色砂質泥岩互層，局部為薄葉互層或紋層，偶夾灰白色砂岩層(約數十公分)，局部稍破碎	50
194.00—215.70	灰色至灰白色砂岩，偶夾泥岩薄層或紋層，局部破碎	10
215.70—255.20	灰色砂岩與灰黑色砂質泥岩薄互層，局部為紋層，偶夾40—80公分厚後砂岩或泥質砂岩，局部稍破碎	45
255.20—285.00	灰色至灰白色砂岩，局部為泥質砂岩，局部有生物擾動現象，偶夾薄層灰黑色泥岩，局部破碎	19
285.00—302.15	灰色砂岩與灰黑色泥岩薄互層，砂岩為主，局部稍破碎	13
302.15—315.20	灰色砂岩與灰黑色泥岩薄互層，泥岩為主，局部稍破碎	19
315.20—329.60	灰色砂岩與灰黑色泥岩之薄互層，砂岩為主，局部稍破碎	16
329.60—342.30	灰色砂岩與灰黑色泥岩之薄互層	29
342.30—345.00	灰黑色泥岩夾薄層灰色砂岩或薄互層	4

4.3 立體投影統計及分析

對於大地工程師及地質師而言，習慣將地質弱面繪於立體投影圖上，以瞭解弱面交互關係，作為後續穩定分析之用。RGLDIP 軟體亦提供此一功能，可將調查所得弱面資料之極點，繪於等面積下半球立體投影圖上，如圖 8 為進行弱面立體投影分析的情況。

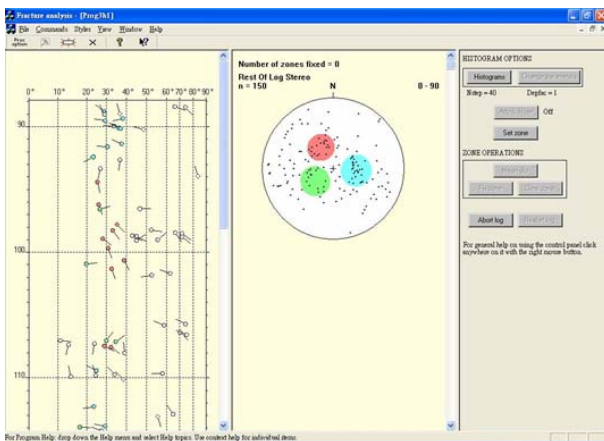


圖 8 弱面立體投影分析(1 號孔)

更進一步地，RGLDIP 軟體可根據極點數目統計繪出其弱面密度分佈圖，並可將同一區域數個鑽孔資料整合，找出主要控制之弱面群組。1 號孔經調查後可知地表下 88.2—146.0m 間共有 2 個主要弱面組(含非貫穿裂隙與罅隙)，如圖 9 所示。依弱面數目多寡由

上往下排列，位態分別為 N180°，傾角 33°W；N061°，傾角 29°SE。為釐清不同深度範圍內可能的主控弱面，本計畫將圖 9 內的弱面先排除非貫穿裂隙與罅隙後，再視弱面隨深度的分佈情況進行分段(見圖 10)，進而分別區分各深度範圍內可能的主控弱面。圖 11(a) 為排除非貫穿裂隙與罅隙後，地表下 88.2—146.0m 的主要弱面組及其密度分佈，其弱面分佈較圖 9 為集中。此外，圖 11(b)、(c)及(e)均可明顯標示出一組主控弱面，而圖 11(d)與(f)的分佈情況則甚為離散，代表其深度範圍內並無一明顯的主控弱面。

2 號孔經調查後可得知地表下 76.2—345.0m 間共有 5 個主要弱面組(含非貫穿裂隙與罅隙)，如圖 12 所示。依弱面數目多寡由上往下排列，位態分別為 N211°，傾角 62°NW；N259°，傾角 58°N；N326°，傾角 56°NE；N015°，傾角 60°E；N104°，傾角 44°S。同上述處理流程，圖 13(a)為排除非貫穿裂隙與罅隙後，地表下 76.2—345.0m 的主要弱面組及其密度分佈。由圖 13 可知，除圖 13(e)的弱面分佈情況甚為離散，可標定出五組主控弱面外，圖 13(b)、(c)、(d)及(f)均可明顯標示出一至兩組主控弱面。

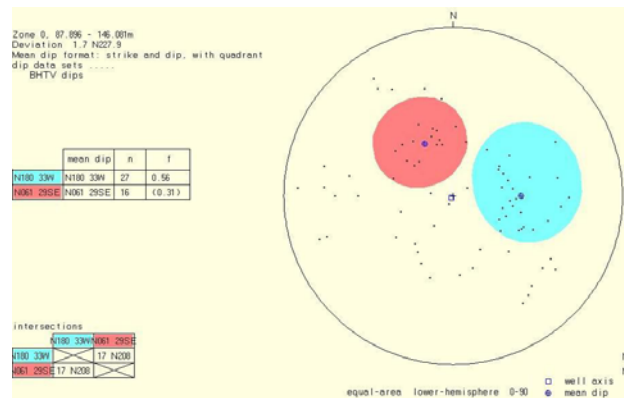


圖 9 主控弱面分組及其密度分佈(1 號孔)

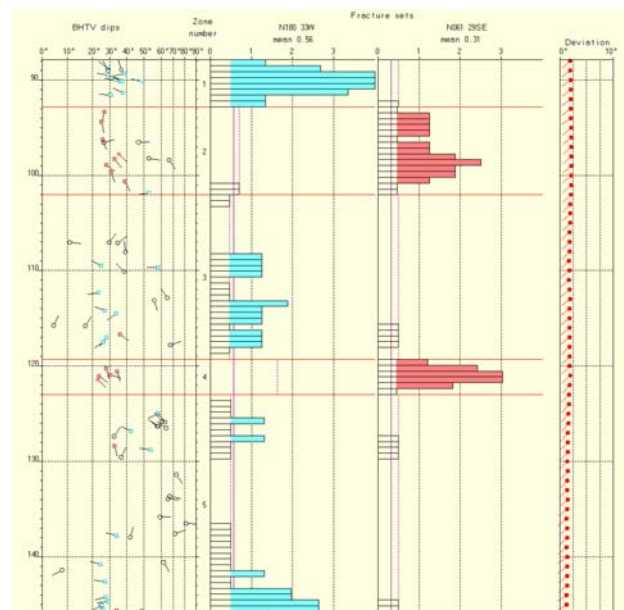


圖 10 弱面隨深度分佈情況及其分段標定(1 號孔)

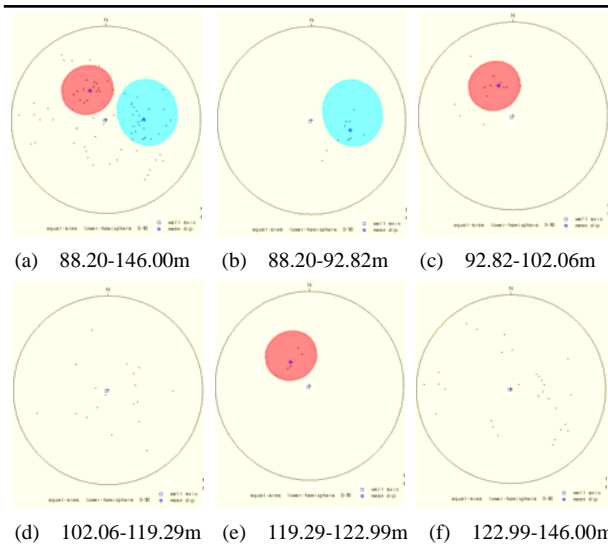


圖 11 不同深度範圍的主控弱面分組及其密度分佈(1 號孔)

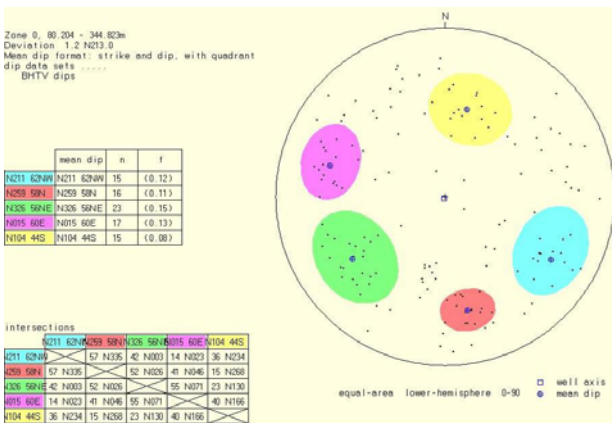


圖 12 主控弱面分組及其密度分佈(2 號孔)

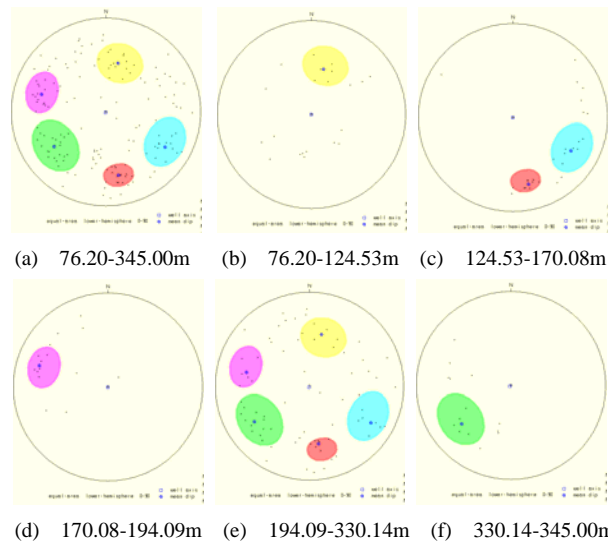


圖 13 不同深度範圍的主控弱面分組及其密度分佈(2 號孔)

上述成果顯示，1 號孔主要弱面傾角約介於 29° — 33° ，2 號孔主要弱面傾角則介於 44° — 62° ，與圖 1 之水文地質圖所繪結果相近。由圖 9 至圖 13 的成果可知，藉由地層岩性或地質構造(弱面分佈情況)分別繪出其弱面密度分佈圖，不僅可解析弱面位態呈現離散分佈的現象及原因，亦能精準地掌握各深度範圍的主控弱面。

4.4 孔內攝影影像與鑽孔岩心之比對

在以往的地下弱面調查，因鑽孔岩心常不易或無法判斷岩心顯示之弱面為原生或因為鑽取破裂引致，若岩心提取率不高或人為疏失時，甚至無法確保岩心箱內鑽孔岩心是否放對位置。因此，透過孔內攝影調查不僅可提供雙封塞水力試驗選段之資訊，亦可作為檢視鑽孔岩心之用。

經由 1 號與 2 號孔之孔內攝影影像與鑽孔岩心比對，初步可瞭解鑽孔岩心位置與孔內攝影影像有所差異，如 1 號孔於深度 133.2—136.1m 處，岩心箱之鑽孔岩心較孔內攝影影像位置往下偏移 0.85m，如圖 14 所示；2 號孔於深度 272.0—274.8m 處，岩心箱之鑽孔岩心較孔內攝影影像位置往下偏移 0.75m，如圖 15 所示。從較宏觀的角度來看，鑽孔岩心可提供地層內岩性與地質狀況隨深度之分佈，惟未必可正確反應地層中相對應深度之裂隙分佈。因此，若需確保雙封塞試驗所挑選試驗段之訊息，除鑽孔岩心資訊外，仍須配合孔內攝影調查，方可掌握該試驗段之裂隙分佈情況，獲得較良好之試驗成果。

除上述鑽孔岩心位置需藉由孔內攝影調查進行修正外，孔內攝影調查成果，亦可檢視鑽孔岩心之弱面是否因鑽取過程而破裂，如圖 16 中之圈選處，比對孔內攝影成果可明顯看出此鑽孔岩心係因鑽孔引致破裂，而非原生弱面。

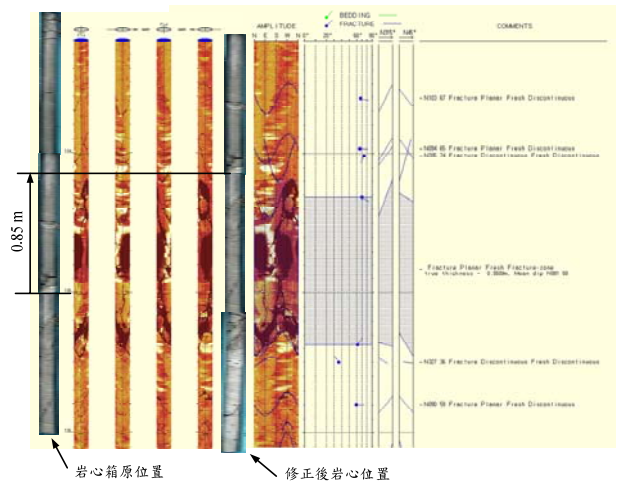


圖 14 與鑽孔岩心比對結果(1 號孔，深度：133.2—136.1m)

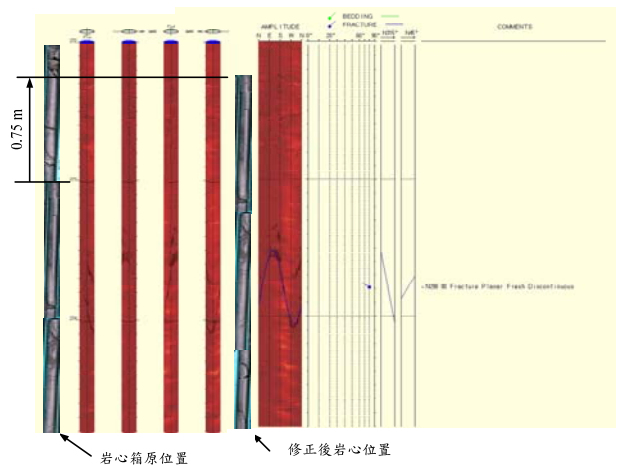


圖 15 與鑽孔岩心比對結果(2 號孔，深度：272.0—274.8m)

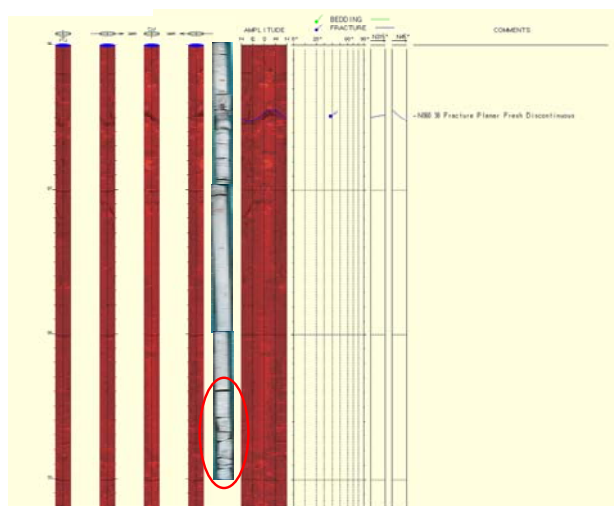


圖 16 與鑽孔岩心比對結果(2 號孔，深度：96.0—99.2m)

五、結論與建議

文中以曾文越域引水工程計畫的兩孔長鑽孔為例，透過音射式孔內探測儀進行地質探查，並將其成果與鑽探岩心進行比對，綜合本文所得之各項研究結果，茲摘要提出下列幾點結論與建議，以供各界參考。

5.1 結論

1. 本系統具有強大的後處理能力，可研判岩層狀況、量測鑽孔內節理及裂隙分佈及位態等資料，並進一步進行立體投影分析與統計，提供工程師豐富的工程地質資料。
2. 孔內裂隙位態(攝影)調查不僅可掌握鑽孔內裂隙分佈情況，提供雙栓塞透水試驗段選擇之資訊，亦可判斷岩心顯示之弱面為原生或因為鑽取破裂引致，作為檢視鑽孔岩心之用。
3. 1 號孔經調查後可知地表下 88.2—146.0m 間共有 2 個主要弱面組(含非貫穿裂隙與罅隙)，依弱面數目多寡由上往下排列，位態分別為 N180°，傾角 33°W；N061°，傾角 29°SE。
4. 2 號孔經調查後可得知地表下 76.2—345.0m 間共有

5 個主要弱面組(含非貫穿裂隙與罅隙)，依弱面數目多寡由上往下排列，位態分別為 N211°，傾角 62°NW；N259°，傾角 58°N；N326°，傾角 56°NE；N015°，傾角 60°E；N104°，傾角 44°S。

5.2 建議

1. 孔內探測儀為一快速且準確之地質判釋工具，值得廣泛推廣，以提升工程規劃與設計階段之鑽孔價值與地質調查成效。

參考文獻

- [1] Tseng, D. J., Tsai, Bin. R. U., and Chang, L. C., "A Case Study on Ground Treatment for a Rock Tunnel with High Groundwater Ingression in Taiwan," Tunneling and Underground Space Technology, 16, pp. 175-183 (2001).
- [2] 張文城、張龍均，「雪山隧道特殊地質施工案例探討」，2004 海峽兩岸地工技術岩土工程交流討論會論文集，第 45-58 頁，台北，台灣 (2004)。
- [3] 黃俊鴻等人，「雪山隧道工程施工湧水與鄰近地表、地下水文集翡翠水庫進流變異之關聯研究」，交通部台灣區國道新建工程局專案研究報告，台北，台灣 (2005)。
- [4] 楊豐榮，「曾文水庫越域引水隧道工程水文地質研究」，第五屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，台北，台灣 (2006)。
- [5] 交通部中央氣象局網站(<http://www.cwb.gov.tw/>)。
- [6] 中興工程顧問股份有限公司，「曾文水庫越域引水工程計畫—隧道工程補充地質調查試驗及評估報告」，經濟部水利署南區水資源局，台灣 (2005)。
- [7] 楊豐榮、顧承宇、譚志豪、許世孟、鍾明劍，「曾文越引隧道工程水文地質之調查與分析評估」，地工技術，第 112 期，第 69-80 頁 (2007)。