

岩盤工程實務與教學應用-以水文地質調查為例

顧承宇¹ 許世孟² 鍾明劍³ 羅鴻傑⁴

¹國立台灣海洋大學河海工程學系

^{2,3,4}財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

摘要

岩盤工程係一門結合岩石力學與工程實務之專業學科，多數岩盤工程案例常處於偏僻山區或是位於地下，尤其是重大之岩盤工程案例由調查、規劃、設計、與施工之實務經驗，若非處於工程設計單位，實非容易親自體會。本文提供水文地質案例調查之目的、背景、使用之儀器設備資料、現地工作準備過程、相關理論及成果之分析。另彙整相關照片、教育訓練資料、與作業手冊說明等，以結合理論及實務應用為目標，期增加學習者的動機及興趣，以促進不同世代之交流與經驗傳承。

關鍵字：岩盤工程、水文地質、岩石力學、地下水。

一、前言

岩盤工程係一門結合岩石力學與工程實務之專業學科，多數岩盤工程案例常處於偏僻山區或是位於地下，尤其是重大之岩盤工程案例由調查、規劃、設計、與施工之實務經驗，若非處於工程設計單位，實非容易親自體會。一般岩石力學課程主要多以課堂講解理論為主，另受限於昂貴之現地儀器設備及試驗場地，學員不易獲得實際岩盤工程實務之訓練與視野。有鑒於此，本文嘗試以水文地質調查為例，利用孔內攝影設備及現地水力調查設備等儀器配合實際之工程案例，進行水文地質案例調查之說明介紹，並分享相關經驗、心得與成果。本文提供水文地質案例調查之目的、背景、使用之儀器設備資料、現地工作準備過程、相關理論及成果之分析。另彙整相關照片、與教育訓練資料等，以結合理論及實務應用為目標，期增加學習者的動機及興趣，以促進不同世代之交流與經驗傳承。

二、岩盤工址水文地質調查

2.1 岩盤工址水文地質鑽探調查

岩盤工址水文地質鑽探調查主要之目的為探查地質、採取岩樣土樣、進行水文地質試驗、與對進行地質構造和水文地質條件綜合評估等。水文地質鑽探屬於地質鑽探的一部分，目前國內用於水文地質調查的鑽探方式主要有衝擊式鑽探法(衝鑽法)及旋轉式取心鑽探法(旋鑽法)。衝擊式鑽探法目前廣泛應用於國內之鑿井工作，通常只能取得土層之少量碎屑，故如果鑽具未經特別改良，對於土層之完整取樣較為困難。衝鑽法適用於卵礫石層，在進行鑽探即設井工作時，一般是將卵礫石層擊碎，並以吊筒取礫屑。而旋轉式取心鑽探法為一種較新的鑽探方式，適用於鬆軟土層及堅硬岩層，但是通常較少使用於厚層卵礫石層區域。旋鑽法係利用鑽機旋轉帶動鑽桿、岩心筒及鑽頭的旋轉鑽入地層中，在其施工過程中須不斷的貫入水或泥漿，目的除了冷卻鑽頭外，更可以藉由循環水的流出而將鑽屑帶出，此外泥漿水的流動

可以保持井內之壓力、穩固井壁、防止垮孔或卡鑽。取岩心時，因岩心筒在最前端，所以必須提出所有的鑽桿，繼續鑽探時，則依序將鑽頭、岩心筒及鑽桿一節接一節接好放入井孔，直到預定鑽探深度，則可以繼續施鑽。一般的旋轉鑽法，由於上下鑽桿之手續過於耗時，在深孔鑽探時效率較低。鋼索取心法(Wireline Coring Method)即是利用上下捲揚鋼纜，免去拆裝全部鑽桿之手續，所採用的較便利的旋鑽方法，可以大大提高岩心鑽進速率，而且提高了岩心之回收率。

地質鑽探為地質調查最直接的方法，鑽探取樣之岩心樣本如圖 1 所示，可了解地層岩性以及不連續面分佈，但是因鑽探鑽桿旋轉之故，岩心樣本僅能研判弱面之傾角，無法研判弱面之方位，若且鑽探非沿重力垂直方向進尺，也將影響孔隙不連續面之傾角位態。

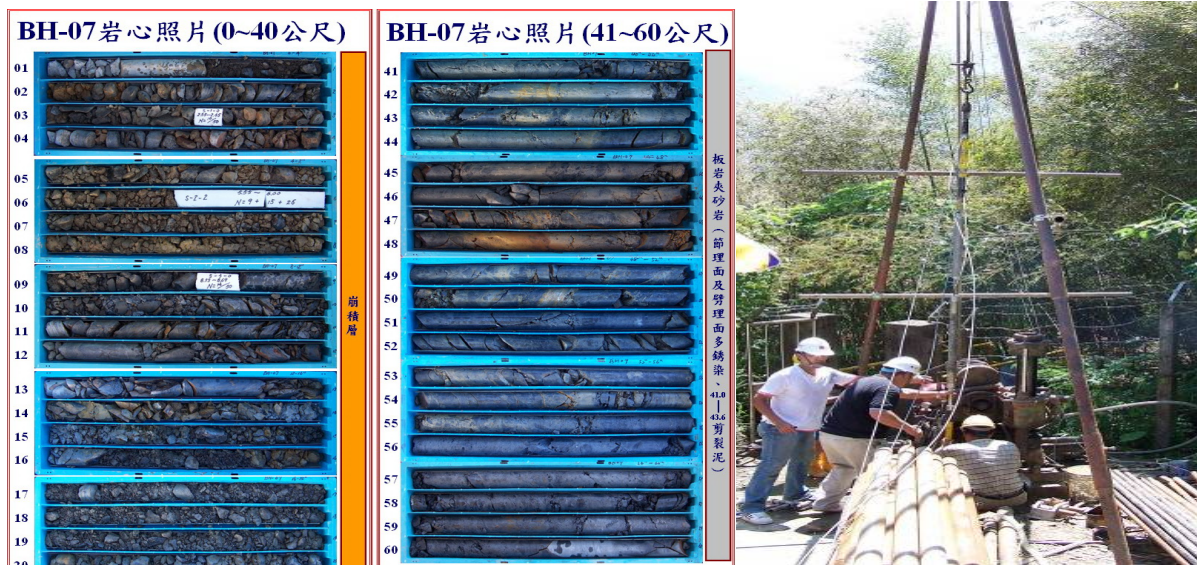


圖 1 岩盤工址水文地質鑽探之岩心成果(右圖為旋轉式取心鑽探法機具照片)

2.2 孔內岩體裂隙位態調查

依據地質鑽探調查資料判斷可能的滑動位置及型態，一般而言存在以下限制：(A) 岩心樣本僅能研判弱面之傾角，無法弱面之位態；(B) 當岩心破碎或無法提取時，即無法了解地下地質狀況，然而該區段往往可能是調查的重點區域；(C) 不易或無法判斷岩心顯示之弱面為原生或為施鑽過程中之機械破壞導致之破裂；(D) 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；(E) 無法檢核岩心箱內鑽孔岩心有無錯置。

有鑑於此，為改善上述限制並提供較佳的可能弱面研判成果，本文特別介紹孔內岩體裂隙位態調查方法，稱之為孔內攝影裂隙位態調查。孔內攝影裂隙位態調查係於鑽孔中置入一掃描設備，直接掃描孔壁情形，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影像掃描所常用，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，光學式孔內探測儀及掃描影像如圖2所示，然此探測儀器缺點在於若孔內地下水水質混濁時，嚴重影響攝影品質；音射式孔內掃描則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，然而此探測儀器在發射超音波訊號時需以地下水作為媒介，因此其最大之缺點是只能在地下水存在的區段進行調查，音射式孔內探測儀及攝影影像如圖3所示。

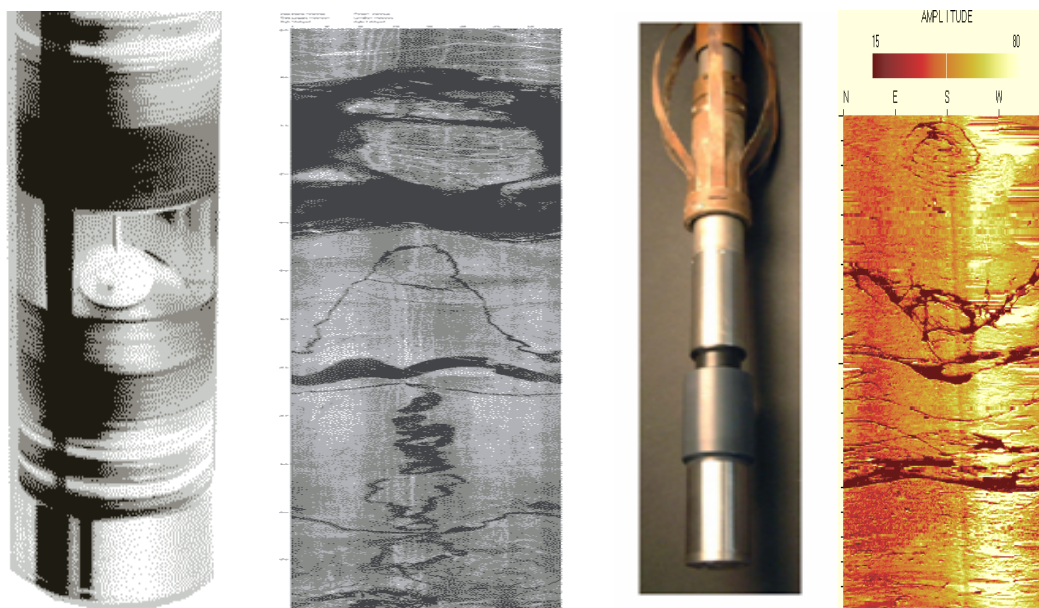


圖 2 (a)光學式孔內探測儀及探測影像 (b)音射式孔內探測儀與探測影像

2.2.1 孔內攝影設備介紹

本文針對音射式孔內探測儀系統，說明主要設備及功能。

(a) 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3所示。探測儀直徑為45 mm，適用孔徑為55~200 mm，溫度範圍為攝氏-20~70 度，最大抗壓力為20 MPa。圖3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。

(b) 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4所示)。本系統之試驗深度可達600 m，速度為0~20 m/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1 mm。

(c) 記錄器

為一自動資料收集處理器，可與電腦直接連線。

(d) 電腦及軟體

包含一般個人電腦及影像處理軟體可記錄、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。

2.2.2 孔內攝影探測步驟介紹

本系統試驗步驟相當簡單、迅速，孔內探測試驗步驟如下：

(a) 於試驗場址組立本系統如圖5所示，實際操作情形參見圖6。

(b) 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。

(c) 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7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。

2.2.3 影像處理與分析

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。影像處理流程包含以下步驟：(a) 磁性異常區域判斷及修正；(b) 鑽孔軸偏角修正；(c) 振幅影像偏心化修正。在完成上述三項影像處理修正後，可進行影像分析包括：(a) 地質構造判斷及標示；(b) 弱面深度分布情形；(c) 立體投影統計及分析；(d) 模擬岩心影像；(e) 鑽孔變形預測等項目，茲分述如后。

(a) 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如圖8所示。以垂直鑽孔為例，可將此正弦軌跡表示如下式。若鑽孔不垂直時，需根據前述修正步驟，將此正弦軌跡正射至所求得之鑽孔方位，即可依下式表示。

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

上式中存在3個待定參數分別為深度，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，影像處理軟體可提供全自動、半自動、以及手動等判斷方法。

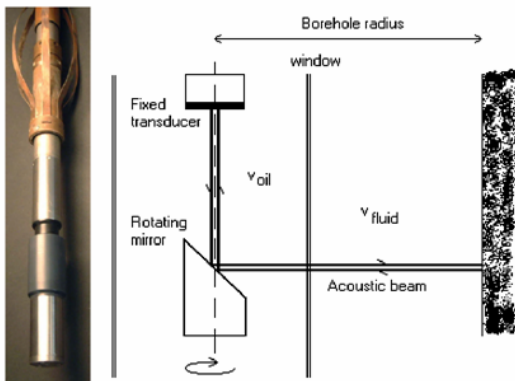


圖 3 音射式孔內探測儀



圖 4 絞車及三角架

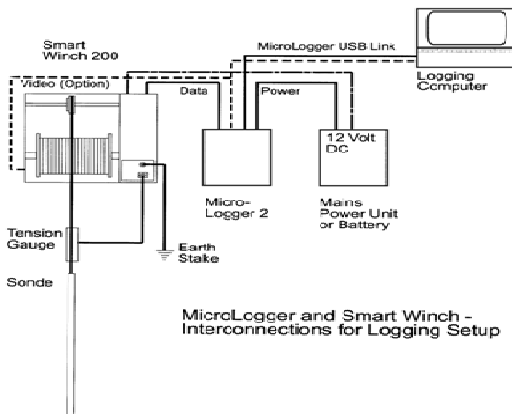


圖 5 系統組立圖



圖 6 實際掃描作業情況

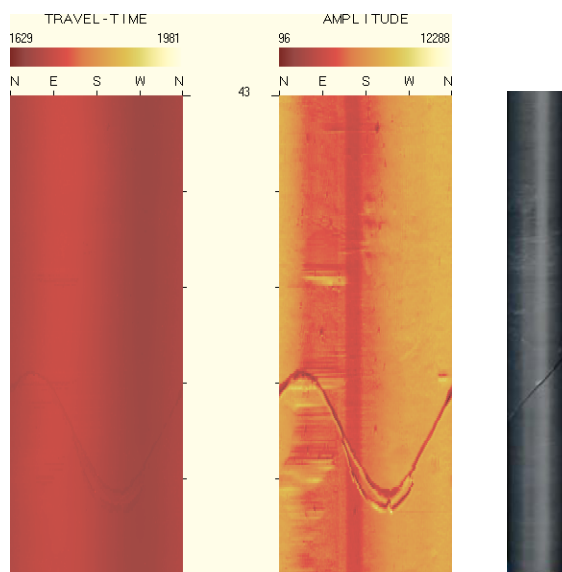


圖 7 探測所得鑽孔圖像與對應之鑽探岩心

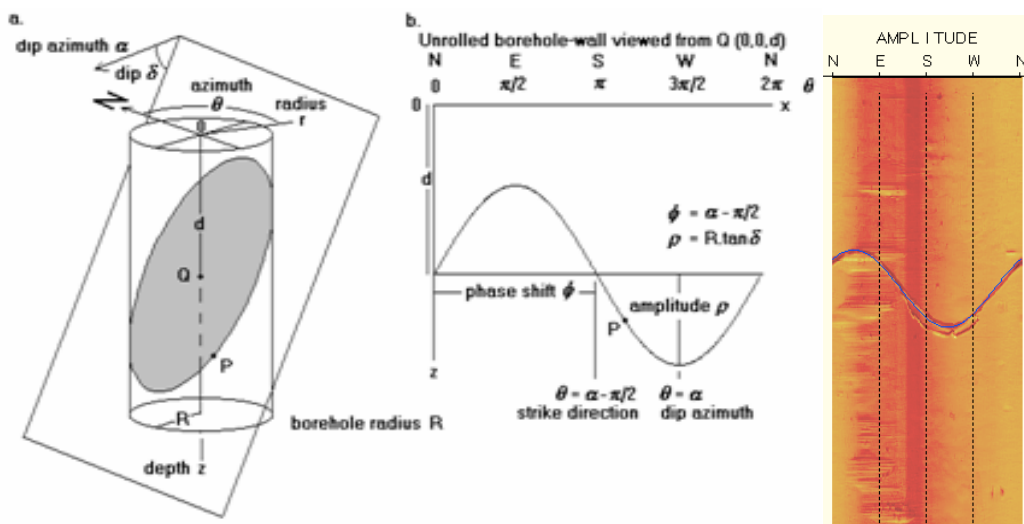


圖 8 平面型弱面與鑽孔斜交呈現之正弦軌跡

(b) 弱面深度分布情形

完成上述地質構造判釋後，電腦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9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。

(c) 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。電腦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。更進一步地，軟體可根據極點數目統計繪出其弱面密度分布圖，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。

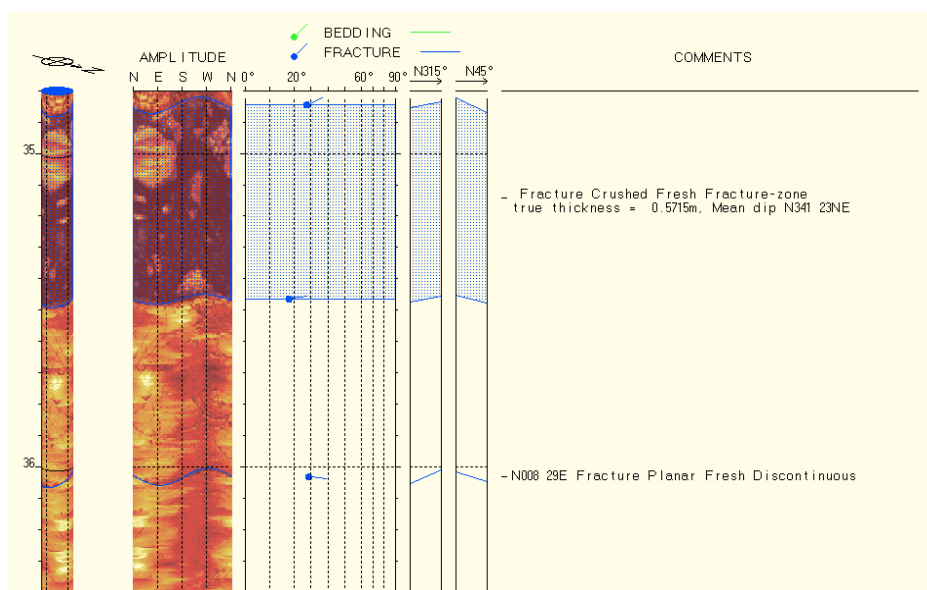


圖 9 弱面位態分析結果

三、岩盤工址水文地質水力試驗與參數評估

岩盤工址水文地質水力試驗主要在調查裂隙岩體的水文地質參數，透過該試驗了解裂隙岩體之水力特性，如能準確掌握其特性，對於面對岩盤相關工程問題時，將可降低水文地質不確定性，以利後續水文地質分析評估之準確度。進行水文地質參數調查工作時，其調查流程為(1)收集地形、地質與岩心資料；(2)進行孔內影像探測；(3)設計雙封塞試驗區段；(4)依據封塞試驗區段挑選合適的試驗方法；(5)試驗資料分析；(6)結果討論，試驗參數調查流程如圖 10 所示。本節將針對試驗目標規劃、鑽孔內水力試驗及水力地質參數分析等內容進行說明。

3.1 岩盤工址水文地質水力試驗規劃與設計

岩盤工址水文地質水力試驗主要目的係推求裂隙岩體的水力傳導係數(Hydraulic conductivity, K)，試驗所得之水文地質參數資料，將作為評估裂隙岩體內複雜多樣之地下水滲流行為之主要依據。規劃試驗之前，必須確認計畫目的及計畫區域的狀況，瞭解計畫目的可初步規劃水力試驗調查方向；計畫區域的狀況可知研究區域的地質條件，並從中獲知水力試驗的困難度，在規劃之前可提前準備相關因應措施。

一個完整的試驗規劃包括：(1)收集計畫區域及現存鑽孔的地質及水文條件：瞭解地下岩體的岩性及含水層的幾何形狀以協助試驗資料的分析與解釋；(2)鑽孔孔內影像探測：透過孔內影像探測獲取鑽孔岩層狀況，節理及裂隙分佈之確切位置，以利後續鑽孔水力試驗位置規劃；(3)試驗位置的選擇：依據實驗目的從孔內攝影影像來挑選試驗位置，例如試驗目的是獲取主要含水帶之岩體透水性，則須選擇多裂隙區段進行雙封塞水力試驗；(4)試驗方法的選擇主要依據以下三原則行之，分別為試驗經費、試驗場址地質條件及試驗方法，儘量使所獲取之現地試驗水力傳導係數可代表較大區域之岩盤工址水文地質特性。此外，如地質條件允許執行抽水試驗情況下，必須同時選定一個合適的抽水速率進行抽水試驗；(5)試驗時間：試水時間必須足夠，以抽水試驗為例，Hamill and Bell (1986)和 Kruseman and de Ridder (2000)曾對抽水試驗提出不同含水層類型所需試驗時間，例如受限含水層、滲漏含水層與非受限含水層分別為 24 小時、48 小時及 72 小時，在低滲透性裂隙岩體則為 10 至 15 小時。

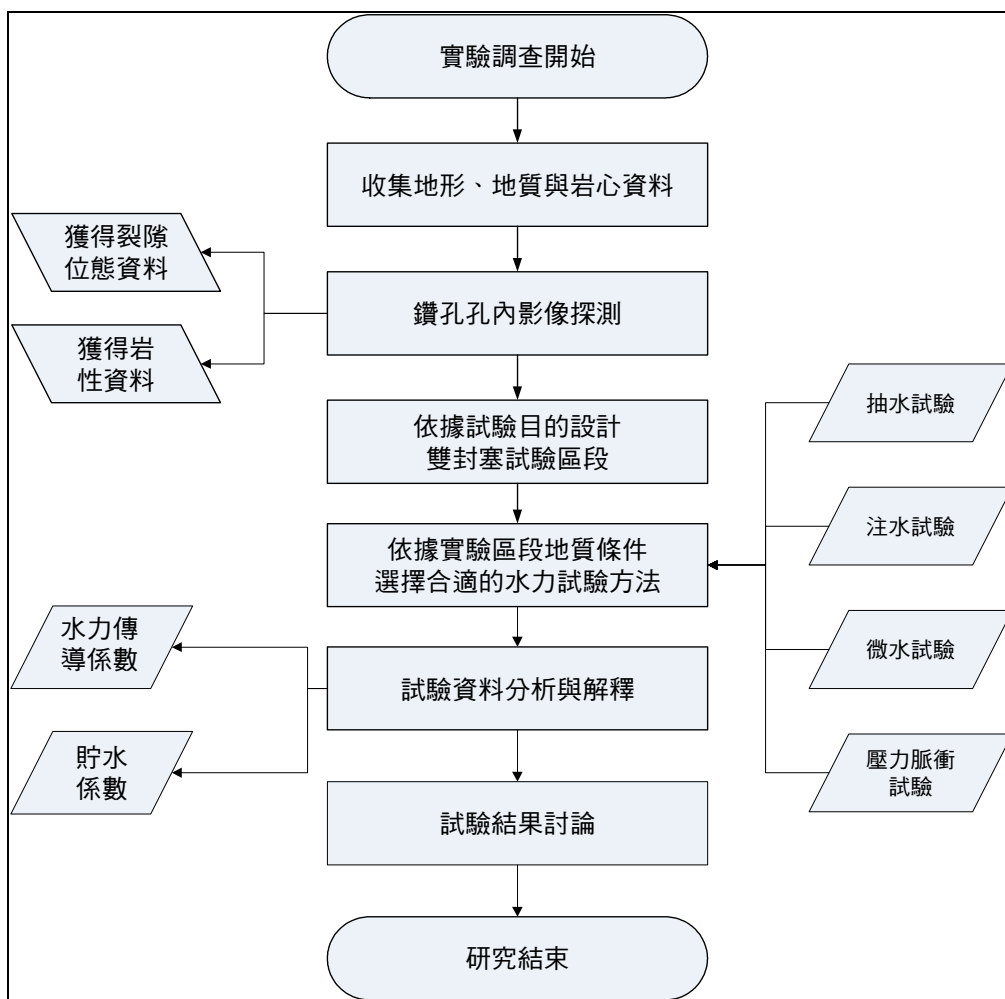


圖 10 水文地質參數調查流程圖

3.2 單井水力試驗種類與試驗步驟

雙封塞試驗可分單井及複井水力試驗，因本文之主題著重在岩盤工址之水文地質試驗，研究區域有著工作環境險惡與調查經費昂貴之特性，調查的方式多選擇單井的水力試驗為主，雖然單井水力試驗並無法像複井水力試驗得到較多含水層相關資料，但它有著經濟及實驗時間短之優勢。

一般單井雙封塞水力試驗有四種試驗方法：(A)定流量(Constant flow test)；(B)定水頭(Constant head test)；(C)微水試驗(Slug test)；(D)壓力脈衝試驗(Pressure pulse test)。傳統上，試驗方法的選擇是依據(1)試驗區段的水力傳導能力(地質條件)；(2)水文地質參數所代表的岩體區域；(3)可支配時間；(4)儀器設備。

現地試驗步驟歸納如下：

(1) 利用壓力脈衝試驗方法，以額外施加壓力(P_0)之恢復時間長短測試試驗區段岩盤透水性；

(2) 當流量閘門關閉後，如果 P_0 瞬間恢復至零，代表岩盤滲透性良好，可採用抽(注)水試驗方法；

(3) 如果 P_0 恢復時間在 2 至 5 分鐘內，代表岩盤滲透性較差，可先採用注水試驗，如果流量計讀取不到注水流量下，再採用微水試驗完成試驗；

(4) 如果 P0 恢復時間相當緩慢，代表岩盤滲透性非常低，則採用壓力脈衝試驗方法；

(5) 依據步驟(1)岩盤滲透性診斷試驗結果，選定合適水力試驗方法，進行水力試驗工作，相關試驗方法可參考上述試驗方法論述內容；

(6) 紀錄水位洩降對時間關係(抽水試驗)；流量隨時間關係(注水試驗)；水頭壓力對時間關係(微水試驗及壓力脈衝試驗)。

此外，雙封塞水力試驗成功與否之重要的關鍵在於試驗過程中封塞與孔壁是否有滲漏發生，一但有滲漏但未察覺，利用此實驗數據進行水文地質參數分析，所得的結果將不可靠。為確保每組雙封塞水力試驗資料的正確性，在試驗過程中可採取兩個方式進行檢驗，一是試驗過程中觀測地下水位是否從孔口溢出；二是觀測上封塞水壓計與下封塞水壓計是否有異常，通常如果封塞未封住孔壁，壓力計之壓力會產生隨時間上升之傾向。試驗過程中一旦有任一檢驗點未通過時，需立刻停止試驗，檢討滲漏原因及檢查設備，直到發現解決方式後，才開始進行試驗。

3.3 資料分析方法

現地水力試驗所得資料可利用現有理論方法(Dawson et al., 1991; Kruseman et al., 2000; ASTM 制定現地水力試驗標準分析方法)解釋現地試驗所紀錄之試驗資料，藉以推估裂隙岩體含水層水文地質參數。每種理論模式代表水力試驗過程中在某種地質構造條件下可能出現之地下水流動行為，綜觀目前理論模式包含的含水層型態除裂隙含水層外，尚有侷限、非侷限、滲漏含水層等型態。此外，試驗資料可能隱含孔徑、孔壁和邊界效應之影響，在模式選擇上必須一併考慮，因此試驗資料分析重點在辨識含水層型態及孔徑、孔壁和邊界等效應存在與否。

基於地質之不確定性，僅採用單一的理論模式分析現地水力試驗資料潛藏許多之不確定性，考量含水層的異質性及非等向性，應從試驗所得結果透過各種不同之分析模式以進行資料定量和定性之分析。定量分析可得水文地質之參數值，而定性分析可藉由理論模式以解釋目前試驗含水層的型態(侷限、非侷限、滲漏或是裂隙含水層等)及試驗過程中孔徑、孔壁和邊界效應存在與否之辨識，以推估最符合岩盤工址之水文地質參數。

現地水力試驗所獲得之試驗資料，可以理論模式進行手動之圖解法解算或採既有之數值分析程式，如 AQTESOLV (Duffield, 2004)等進行自動匹配，匹配過程係找出某一理論模式與觀測資料具最小誤差，求解過程將以自動化行之，故可迅速利用不同之解析解得到應對水力參數值，取代傳統利用手動之圖解法。

四、結論

岩盤工址之岩層與裂隙特性充滿高度非均質與變異性，如何結合大地工程專業學識研判岩盤工址相關力學與水力特性係為一重要課題。尤其台灣地區自集集地震後岩盤受到劇烈擾動而非常破碎，近幾年極端颱風豪雨事件頻繁，導致山區發生大規模的山崩與土石流等地工災害，岩盤工址之調查之技術實有必要加以強化。多數岩盤工程案例常處於偏僻山區或是位於地下，尤其是重大之岩盤工程案例由調查、規劃、設計、與施工之實務經驗，若非處於工程設計單位，實非容易親自體會。另一般岩石力學課程受限於昂貴之現地儀器設備及試驗場地，往往多僅能以課堂講解理論為主，學員不易獲得實際岩盤工程實務之訓練與視野。有鑒於此，本文嘗試以水文地質調查為例，利用孔內攝影設備及現地水力調查設備等儀器配合實際之工程案例，進行水文地質案例調查之說明介紹，並分享相關經驗、心得與成果，期增加學習者的動機及興趣，以促進不同世代之交流與經驗傳承。

五、謝誌

本文部份工作成果承蒙經濟部中央地質調查所協助，特此致謝。

參考文獻

1. 冀樹勇 (2006), 「FLAC3D-在大地工程的應用」, 土木水利工程專業軟體應用經驗交流研討會, http://seminar.sinotech.com.tw/Seminar/elearning/811_4/index.html。
2. 中興工程顧問社 (2007), 易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置第 1 階段實施計畫「集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估期中報告」, 經濟部中央地質調查所, 台灣。
3. 楊豐榮、顧承宇、譚志豪、許世孟、鍾明劍等 (2007), 「曾文越引隧道工程水文地質之調查與分析評估」, 土工技術雜誌, 第 112 期, 第 69-80 頁。
4. 中興工程顧問社 (2001), 「隧道水文地質調查準則(含解說)」, 中華民國隧道協會, 台北。
5. 李錦發、邱禎龍、魏正岳、李彥良、蘇泰維、黃健政 (2007), 「山崩與土石流調查與山崩潛勢分析」, 地質環境與資源研討會論文集, 第 79-86 頁。
6. 許世孟、顧承宇、鍾明劍、蘇泰維、李錦發 (2008), 「岩盤工址之水力特性調查與案例應用」, 土工技術, 第 115 期, 第 35-44 頁。
7. 蔣立為、歐陽湘、杜培欣 (1988), 「地下水文地質特性參數量測—雙封塞技術之應用」, 土工技術, 第 69 期, 15-24。
8. Dawson, K. J. and Istock, J. D. (1991), Design and Analysis of Pumping and Slug Tests, Lewis Publishers, Michigan, USA.
9. Duffield, G.M. (2004), AQTESOLVE version 4 user's guide, Developer of AQTESOLV HydroDOLVE, Inc., Reston, VA, USA.
10. Hamill, L. and Bell, F. G. (1986), Groundwater Resource Development, Butterworths, London, pp. 344.
11. Hsu, S. M., Chung, M. C., Ku, C. Y., Tan, C. H., Weng, M. C. (2007), "An Application of Borehole Acoustic Televiewer and Double Packer System to The Study Hydraulic Properties of Fractured Rocks: A Case Study in Kaohsiung, Taiwan," 60th Canadian Geotechnical Conference&8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Ottawa, Canada, V.1, pp. 415-422.
12. Kruseman, G.P. and de Ridder (2000), N.A., Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd edn, Intl. Inst. For Land Reclamation and Improvement, Publication 47, Wageningen, pp. 377.
13. National Research Council (NRC) (1996), Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications, National Academy Press, Washington DC. 551pp.
14. Singhal, B.B.S., and Gupta, R.P. (1999), Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp.151-168.

ABSTRACT

Rock engineering is a subject which needs to combine the rock mechanics and engineering practice. Most rock engineering applications are located in remote montane areas which are often difficult to access. In particular, the investigation, planning, design, and construction of a rock engineering application is usually achieved by the professions of geotechnical engineering. It is, therefore, seldom to have a chance to introduce to the students in the class. This paper provides the engineering experiences on hydro-geological investigation of rock masses. We hope that it can stimulate the motivation of junior engineers and students for studying the rock engineering through the detailed materials and supplementary photos from this paper.

Keywords: rock masses, hydrogeology, rock mechanics, groundwater.