

工程地質調查

謝敬義*

(續41期)

四、工程地質調查方法

為收集上述各重大工程計劃評估所需之資料，必須進行工程地質調查。以下將就各種工程地質調查的方法以及所能提供之地質資料加以討論以供編擬工程地質調查計劃書時之參考。

4.1 地表地質調查

地表地質調查為所有工程計劃中最基本的重要調查項目之一。小至輸電線鐵塔塔位基礎、大至大型水力發電計劃中壩址、水路隧道、電廠等各工址之調查，無不需要地表地質調查。地表地質調查為工程結構物工址及其相關附近地區地質情況實地觀察所獲取之第一手資料。此項資料可供擬定進一步地質調查計劃時之重要依據。基於工程上的需要，地表地質調查的項目應依調查的目的以及與工程有關的地質資料加以詳細蒐集與分析。一般而言，進行地表工程地質調查的主要項目及所蒐集的地質資料概可分為下列數項：

4.1.1 工址及其附近之地形資料

地形上，地貌的起伏高低常反應此地形區的地質情況及其演變的過程。在工程的應用上，工址或結構物所座落基礎的穩定性為工址選擇的首要考慮因素。因此，在地質作用演變的結果，地形上所堆積的

崖錐、沖積扇狀地、崩壞地或崩山帶，台地堆積，以及喀斯特地形等均屬於不穩定地盤。任何結構物位於或通過此種地形區均應加以詳細進一步調查與評估。

4.1.2 區域性地質資料

本項地質資料為大型工程計劃中整體性地質狀況之瞭解，詳盡之區域性地質資料除可供工程規劃、設計及施工計劃之研擬外，亦可做為工程對環境影響評估之依據。因此，區域地質調查為地表地質調查中最繁重的工作。工程地質師必須親赴現場收集資料並作詳細之分析與研判，製作區域地質圖以及撰寫地質報告以供工程規劃之用。此項區域地質資料之要目包括：

- (1) 調查區域之地層種類與分佈
- (2) 各岩層之岩質特性
- (3) 調查區域範圍之地質構造特性，包括地層走向傾斜，區域構造形態，向斜背斜構造、斷層特性以及節理型態等。
- (4) 表面覆蓋層情形。包括覆蓋層之組成，範圍深度及其來源等。
- (5) 地表水及地下水之情況。
- (6) 地熱或瓦斯之存在情況。
- (7) 骨材供應情況。

4.1.3 結構物基礎調查

此項調查為結構物設計與施工時所應事先進行之詳細地質調查。其調查項目常需配合其他諸如地質鑽探及地下探查試坑

*台灣電力公司專業地質工程師

等以瞭解結構物所座落基礎之實際地質情況。對於大型結構物尚須進行現場之力學試驗。其地質資料之要求精度亦較前述區域性地表地質調查所得之資料遠為精細。因此，現場露頭之地質情況，岩體之風化程度，節理型態之統計分析等都須一一加以蒐集。所依據之地形圖比例尺多為1/500至1/2000精密度較高者。

4.1.4 工程地質圖

前述各項地表地質調查所獲取資料，除應有詳細書面之調查報告外，最重要者係將各項地質資料經分析研判後製作地質圖，良好之工程地質圖具有足夠的地質資料，以供工程規劃、設計與施工之參考。製作工程地質圖之精度與範圍應依工程規劃作業分期進行。有些工程地質圖尚需將與工程計劃有關之各項地形與地質資料投繪在相關之工程佈置圖上（謝敬義，民國78年）。

4.2 航照判釋與遙感探測

前述地表地質調查主要係由地質師前往計劃現場收集地質資料再經研判分析以及各種作圖法而繪製地質圖。但某些計劃地區，地形險峻或高山崇嶺，人力不易到達區域廣闊以及植生茂密，地質資料取得困難時，需借助於航空照片或遙感影像照片。航空照片實際上與一般的照像技術相同，由飛機利用高解析度之照相機在高空上所拍攝之照片。兩張互有重疊之航空照片在立體鏡之下觀視能顯現立體效果。因此能將地質上之岩性及構造特徵顯現在地貌之表面。遙測影像為航照進一步之高深技術。其主要原理係利用各種物體對光波或電磁波之幅射、反射能力之差異，在高空中以人造衛星或飛機由特殊之照像設

備或感應器材經特殊處理後加以顯示或儲存在記憶體中，再經特殊電腦設備處理後顯現具體之影像以供辨識或研判。其所能提供之地質資料包括：

4.2.1 影像涵蓋地區的地形特徵

由地形型態特徵可分析研判地表堆積物之種類、如崖錐崩積層、河川沖積層、台地堆積層、風積層、冰積層、沖積扇、崩壞地、古今崩山帶、地盤下陷、火山錐等。

4.2.2 水系分佈

由於不同地質的地盤，對於侵蝕與風化之抵抗力有所差異，故常顯現不同水系之型態。故由水系型態亦可大致推定當地之地質情況。

4.2.3 溫泉或泉水分佈

由於遙感感應器對各種不同之光譜或熱幅射效應具有相當靈敏之接收程度，人跡不易到達地區可由遙測影像中顯現出來。

4.2.4 斷層位置及延伸長度及其活動性

航照判釋以及遙感影像在進行斷層調查時，可由影像或照片中之線型構造配合其他前述地形特徵、水系分佈中河流路徑變化以及泉水分佈、崩山帶等推測斷層位置、延伸長度、甚至於斷層的活動性。

4.2.5 區域地質構造

地表地質調查時，若露頭不佳或岩層對比或辨識不良時，常不易瞭解區域地質構造特性。借助於航照與遙感影像配合地面現場之地質調查常可獲得較佳之解釋。在繪製地質圖時可獲得事半功倍之效果。

4.2.6 其他沖蝕、淤積、人工開挖、水土流失等對工程設施不利之地質因素亦可自航照與遙測影像中加以辨識出來。

4.3 地球物理探查

地球物理探查一般可分為震測法、重力法、磁測法、電阻法、放射性法等數種，其中以重力法、震測法與電阻法在工程上較常應用。其所能提供之地質資料說明如下：

4.3.1 重力法

重力法係利用重力異常值之分佈，研判地下地層相對密度、分佈、厚度以推定地質構造。在大地工程之應用上可測定斷層位置及傾向、深部岩盤面之起伏、地下空洞、深層之古河道遺跡等。

4.3.2 震測法

震測法一般又分為折射法與反射法。

4.3.2.1 折射法

折射法主要為間接測定地下地層之彈性波速度以研判地下地質構造之方法。在工程應用上，由地表折射法亦可瞭解覆蓋層之深度、岩盤面之起伏延伸以及不同岩盤之速度分佈。由走時曲線之分佈型態亦可推估斷層之位置。若利用鑽探井孔進行跨孔、上孔或下孔井測等，則可直接測定彈性波之速度，配合地層密度可計算地層動態彈性模數，動態剪力模數等。

4.3.2.2 反射法

反射法除了海上連續剖面反射法在海岸工程上較常應用外，一般之陸上震測反

射法大多應用在石油探勘技術上，大地工程甚少應用。近年來，由於特殊震源、高頻受波器、多頻道信號疊加式之震測儀以及電腦程式之開發。目前淺層反射信號亦能獲得較佳之效果。此種淺層反射法可測得覆蓋層之厚度，地層或土層之垂直分佈以及斷層之偵測等。

如前所述震測法係根據震波速度推測地質情況，故震測法常需配合其他之地質調查方法，尤其是地質鑽探，方能獲得較佳之效果。在範圍廣闊之基地，鑽孔間距太長時利用震測法，可彌補孔與孔間之地質資料，可作水平方向地層對比。

4.3.3 電阻法

電阻法係利用直流電或交流電通入地下，由於地下各地層含水飽和情況以及電阻之不同，造成電流分佈之差異。由通入地下電流值、電位極與電流值相對位置所計算而得之視電阻率即可評估地下地質情況。目前電阻法在地下水文調查方面應用較廣。由於覆蓋層與岩盤之視電阻率相差極大，故在岩盤面之評估亦有效果。有關地球物理探查方法在工程上之應用，地工技術雜誌第27期另有專文「地球物理探勘技術簡介」，請讀者參考。

4.4 地質鑽探

地質鑽探為所有工程地質調查中最被廣泛採用之調查方法。其所能夠提供之地質資料以及其他目的大致有如下數項：

4.4.1 地層之垂直與水平分佈情況

鑽探深度範圍內，由所取出之土樣或岩心可直接記錄其地層之岩類情況及其性質。孔與孔間之地層對比，亦可據以研判水平方向岩層之分佈。

4.4.2 採樣供作試驗

鑽探所取出之土樣或岩心，除了上述直接觀察地層變化外，亦可供試驗室進行各項力學試驗。

4.4.3 可供作觀測孔或試驗孔

鑽探孔於鑽探工作完成後，可埋設水壓計定期觀測地下水位，亦可埋設傾斜儀觀測地層滑動。此外，鑽孔亦可供現場試驗如孔內變形試驗、現場透水試驗或抽水試驗、震測法中上孔、下孔、跨孔等之測量孔。

4.4.4 地質改良

鑽孔可供岩栓、地錨、灌漿、基樁埋設與排水等功能。

4.5 探查坑調查(Exploratory adit)

在可行性以及基本設計階段，為取得較詳細之定量地質資料以及現場之力學資料，尤其在壩工地質之探查應用上常在壩座兩翼開挖水平探查坑。其主要之探查目的約有如下數項：

4.5.1 瞭解壩座兩翼之地質情況以供評估壩座邊坡之穩定性以及評估將來沿壩軸之壩基開挖深度

4.5.2 探查坑內可供作各項現場力學試驗或安裝監測儀器。

4.5.3 探查坑內可進行地質改良工作，如灌漿或層縫處理。

4.5.4 排水廊道

探查坑除了前述由開挖坑道中瞭解地質情況外，亦可供作排水廊道。如台電德

基大壩左岸進水口及排洪隧道對岸之排水廊道。

4.6 濠溝與直井或豎坑

濠溝法主要為覆蓋層材料性質之調查，尤其在活動斷層研究上，常以濠溝開挖觀察斷層與覆蓋層之切割關係。而直井或豎坑通常為骨材調查或進行現場載重試驗之場所。

4.7 剝洗法

在露頭不良地區，而其覆蓋深度不厚之情況下，可利用剝洗法將表土及覆蓋層清除，由露出之岩盤直接觀察岩盤之地質情況。此法曾在翡翠大壩壩址調查時採用。

4.8 試驗

工程地質調查中，試驗亦為主要的調查工作項目。試驗項目應依工程規劃或設計之需要與目的並衡量工程作業情況編擬必要之試驗計劃。若編擬計劃不當，所獲得之資料無法應用，不但浪費試驗費用，且增加不必要之工作負擔。以下將簡要說明各項試驗所能獲取之力學資料。

4.8.1 室內試驗

4.8.1.1 一般物理性質試驗

土壤或岩石一般物理性質試驗，包括土壤顆粒分析、密度、比重、含水量、孔隙率、孔隙比以及阿太堡限度等項目。岩石樣品有時尚包括礦物組成。求得這些指數性質即可大致瞭解其工程特性。此類試驗因試驗簡單，故費用低廉，因此在各種工程計劃中比類試驗為最基本、最普遍之試驗。

4.8.1.2 單向密壓試驗

此項試驗主要為求取凝聚性黏土質土壤之壓縮性質。由試驗質料中可以計算某一荷重下，該黏土質土壤之沈陷數量及沈陷速率。

4.8.1.3 夯實試驗

此項試驗主要係針對回填材料之工程特性求其回填時可得最佳密度之之最佳含水量(OMC)。

4.8.1.4 相對密度試驗

本項試驗為求取非凝聚性土壤之壓縮性以及抗剪強度。在評估土壤液化潛能時，相對密度之大小為重要之指標。

4.8.1.5 無圍壓力試驗

此項試驗對土壤而言，僅可當作一種強度指標，以供土壤性質比較，無法作為工程計劃之依據。但對岩石基礎而言，則其單軸抗壓強度配合其他之岩石特性如RQD等可大致估計其承載力以及剪力強度。此項試驗在加壓過程中，若在試體上安裝軸向與側向應變計則可自應力應變曲線中求取彈性模數及波松比。

4.8.1.6 三軸試驗

三軸試驗主要為求取土壤或岩石之剪力強度係數C值 ϕ 角。但土壤三軸試驗則依試驗時壓密或排水情況又分為不壓密、不排水試驗(UU)；壓密不排水(CU)；壓密排水(CD)等三種試驗。選擇土壤三軸試驗時必須考慮工程設計與施工過程，模擬其可能發生之情況而定。例如在進行土石壩填築時為評估其穩定性，必須瞭解壩體填築後之抗剪強度。因土石壩之填築係在最佳含水量狀態下，分層壓密，壩體內亦有

排水措施，故模擬此種狀況與上述之壓密排水三軸試驗相似，故以壓密排水試驗所得之C值 ϕ 角值作為設計分析之依據。但水庫蓄水後仍有可能發生滲流(Seepage)之現象。故同時也需進行壓密不排水試驗，求其有效抗剪係數，以供分析比較。

對於岩石材料而言，三軸試驗則無上述壓密、排水情況發生。對於不含弱面之岩石而言，進行三軸試驗所求得之抗剪係數，其C值 ϕ 角均甚高，其所代表之抗剪強度為岩石材料之性質，與岩體之強度有所不同，故堅實岩石之三軸試驗並無多大意義。由於目前鑽探器材之精進，對於含有弱面之節理岩石亦可求取甚為理想之岩心供作三軸試驗，其求取之抗剪係數可代表弱面之強度指標。

4.8.1.7 消散耐久性試驗

此項試驗為評估岩石風化低抗性之一種指標。

4.8.1.8.直接剪力試驗

此項試驗為求取土壤或岩石之剪力強度，其目的與上述之三軸試驗相同。但試驗較簡單，費用較低。

4.8.1.9 透水試驗

土壤室內透水試驗主要為求取土壤之透水係數。但其應用不廣。一般土壤或岩石之透水係數以現場求得者較為普遍。

4.8.2 現場試驗

土壤與岩石現場試驗種類及方法繁多，尤其岩石或岩體之現場力學試驗近年來由儀器及理論之發展更不勝枚舉。基本上，現場試驗大致上可分為1.強度試驗，2.變形試驗，3.大地應力試驗；4.透水試驗等四大項，以下將就目前台灣大型工程計劃所

進行之現場試驗加以說明。

4.8.2.1 標準貫入試驗(SPT)與圓錐貫入試驗(CPT)

標準貫入試驗為地質鑽探過程中，對於未固結黏土質或砂質土壤地層最常採用之現場試驗法。若遭遇礫石層，則不適用本試驗。本試驗所獲得之打擊數 N 值可計算土壤材料之相對密度，地層之承载力、剪力強度係數以及評估砂土層在地震時液化潛能評估之依據（趙基盛、陳福勝，民國72年）。此外，由標準貫入試驗中分裂管取樣器所取得之土樣亦可鑑定土層之性質。與標準貫入試驗相似之圓錐貫入試驗，舊式的有一種機械式之荷蘭式圓錐貫入試驗與改良式之電子式圓錐貫入試驗。圓錐貫入試驗與標準貫入試驗相似，主要根據圓錐貫入阻抗與袖管摩擦力等可推定土層構造，土層剪力強度以及液化潛能評估等。同時，電子式兼測水壓貫入錐亦可量測孔隙水壓力（秦中天，民國75年）有關貫入試驗之應用地工技術雜誌第3、13及16期均有詳細之介紹。

4.8.2.2 十字片剪試驗

對貫入試驗之 N 值甚低（小於5）之軟弱飽和黏土質土壤利用十字片剪試驗可推求軟弱黏土之剪力強度。此種試驗係利用鑽孔，以鑽桿末端接上一個十字型鐵片壓入土中，再測定該十字片剪裂土壤所需之扭力。由扭力與剪裂面積之關係即可求得其剪力強度。

4.8.2.3 平鈹載重試驗

平鈹載重試驗主要為測定基礎材料之承载力與變形特性。此項平鈹載重試驗最大的考慮為如何施加垂直荷重。土壤基礎

之加載其裝置較為簡單，因在較小荷重下即有變形，但對於岩盤基礎則因其變形性甚小。故加壓裝置較為特殊，如單錨反力試驗（如台電核四廠址）或利用兩側地錨間之鋼樑作為反力座等（如台電核四廠址）亦有利用前述之探查坑以坑洞之頂拱為反力座進行試驗。

由載重試驗之應力應變曲線可求出岩體之彈性模數與變形模數。

4.8.2.4 現場直接剪力試驗

現場直接剪力試驗可求得土壤或岩石現場之剪力強度， C 值與 ϕ 角。現場直剪需在現場小心開挖一試驗土體或岩塊，施加垂直與剪應力時所需之準備工作與設備甚為複雜。通常均在探查坑內或直井內進行較多。

4.8.2.5 孔內變形試驗

孔內變形試驗係利用垂直鑽孔或水平鑽孔測定土壤或岩盤之變形特性，此項試驗可由土壤或岩盤之變形特性（彈性及變形模數）推估基礎之側向土壓力以及隧道周圍之原始應力狀態。

4.8.2.6 應力解放法

為岩石現場力學試驗之一種主要測定地下岩體內之原始應力狀態，此法曾在台電德基大壩基礎調查時採用，其他類似測定岩體當地原始應力的方法甚多，如套鑽法，水力破裂法，光彈性法等，除套鑽法之應用較多外，其他方法本省之應用較少。

4.8.2.7 現場透水試驗

現場透水試驗之方法甚多。基本上，大致可分為兩大類。一為貫水法，另一為抽水法。前者係將水以各種壓力貫入孔內，由壓力與吃水量之關係求取地層之透水

係數。後者自孔內將水抽出，由附近另一觀測孔中，因抽水孔內之抽水而水位下降關係與抽水量求取透水係數，由於土壤地盤孔壁之穩定性不佳，故對土壤地盤大都採用抽水試驗法。對於岩盤地層則大多採用貫入試驗，即一般所謂的岩盤壓力透水試或稱之為漏程(Lugeon test)試驗（洪如江，民國80年）。此一試驗所得之透水係數單位為Lugeon，故名之。有關節理岩體之透水試驗及分析方法，本文曾有專文討論（謝敬義，民國73年）。由於岩盤壓力透水性試驗中試水壓力僅能在地表之壓力錶中觀測，故實際上，岩盤內之漏水與壓力關係必須再作必要之修正。

岩盤壓力透水性試驗在壩基工程上甚為重要，尤其在進行地盤灌漿改良時，透水試驗結果可評估灌漿之功效。

4.8.2.8 其他試驗

有關其他現場試驗，請見本雜誌第2期“現場試驗法概論”（李寬材，民國72年）。

五、結語

工程地質調查為任何工程計劃規劃、設計與施工過程中不可或缺的工作項目。其所獲得之資料攸關工程成敗。調查計劃之擬定必須深入瞭解工程計劃之內容及作業過程，分析工程計劃所需之評估資料，方能提出合理有效之調查方案，以達事半功倍之效。

參考文獻

李寬材（民國72年），現場試驗法概論，地工技術雜誌第2期。
林炳森、李豐博、賴聖耀（民國75年），荷式錐

貫入試驗與土壤動態性質關係，地工技術雜誌第16期。

洪如江（民國80年）初等工程地質學大綱，財團法人地工技術研究發展基金會。

陳斗生（民國75年）電子式圓錐貫入儀之工程應用，地工技術雜誌第13期。

秦中天（民國75年）電子式兼測水壓貫入錐的應用，地工技術雜誌第16期。

趙基盛、陳福勝（民國72年），標準貫入試驗在基礎設計之應用，地工技術第3期。

謝敬義（民國73年），節理岩體現場壓力透水試驗之方法及資料之研判與分析，土木水利工程學會73年年會論文專集27-50頁。

謝敬義（民國77年），工程地質學之重要性，地工技術雜誌第22期。

謝敬義（民國77年），地質圖、工程地質圖，地工技術雜誌第23期。

謝敬義（民國78年），隧道工程與地質，地工技術雜誌第28期。

Department of The Interior, Bureau of Reclamation, United States ,(1968) , Earth Manual A Water Resources Technical Publication.