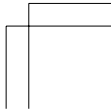
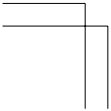
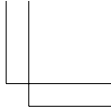
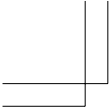


PART 1

基礎篇





CHAPTER 1

緒 言



1.1 工程地質學的定義

工程地質學 (Engineering Geology) 是屬於應用地質學的一支。它是運用地質學的原理、知識、方法、及經驗，為工程服務的一門科技。

所有的工程體（包括建築物）均需立基於地。因此，地基的特性、穩定性、及強度決定了工程體的安全與使用壽命。我們都知道，地基是工程體的基礎；而工程地質學就是工程的基礎。所以，一切工程計畫的規劃及設計，必定是由工程地質先行。先有工程地質的調查，有了工程地質條件的蒐集及取得基礎設計的參數，工程師才有辦法設計。

地質作用 (Geological Process) 是地球與生俱來的一種自然作用。它隨時隨地都在威脅著工程體的安全。一個工程體的基礎，即使設計得再安全都沒有用，因為一個強烈的地震，或者從後山的遠處突然來一個土石流，就可以輕易的把工程體給摧毀。這種地質作用的發生原因、**地質條件 (Geological Conditions)**、影響因素、及作用的性質及結果，地質學家大都已經了解得很清楚。像這種知識的累積，就是來自地質學的貢獻。而將這種知識應用於工程，便可以造福人類，使人類能夠免於因受天然災害的威脅而生的恐懼，因此得以綿延不斷，永續發展。

4 工程地質通論



1.2 工程地質師的任務

工程地質既然是一種服務於工程的科技，所以工程地質師的任務就是要蒐集及歸納既有的地質資料、調查研究預定工址或預定路線的地質條件、確定工程設計參數；同時，要預測潛在地質災害（Geologic Hazards）及建議預防的對策。然後將這些資訊提供給工程師做為規劃、設計、施工、以及營運、維護的應用及參考。因此，工程地質師的主要任務可以分為以下 10 項：

- (1) 闡明候選工址的工程地質條件，並指出對工程有利及不利的因素。
- (2) 找出候選工址所在地及其外圍的工程地質課題，並評估解決對策的可行性。
- (3) 選定地質條件較為優良的工址（確定工址），並依據其地質條件的良窳，對主要及附屬的工程體進行合理的配置與定位。
- (4) 闡明岩土層、不連續面、及地下水的工程地質特性，同時提供合理的設計參數。
- (5) 指明岩土層的工程地質缺陷，以及評估地質改良的可行性及處理方法。
- (6) 根據地質條件建議基礎的型式及深度，以及施工時應注意的事項。
- (7) 建議施工時應做及不應做的事項；對施工中可能造成的危險應該預先警告；就施工時已揭露的剖面進行地質資料的補充或修正。
- (8) 研究、調查、及預測潛在地質災害的成因，並擬定改善及防治的措施。
- (9) 指明工程完成後對地質環境的影響，並預測其未來的發展演化趨勢。
- (10) 預測地質作用對工程體的潛在威脅，並且提出預為防患之道。



1.3 工程地質學的內容

工程地質學可以分成基礎地質學、工程地質調查、工程地質分析、地質災害預測、及災害原因調查與防治對策等幾個重點項目。

基礎地質學是一個工程地質師要從事工程地質調查及地質災害預測時所需具備的地質學基本知識。例如所有工程體都是立基於岩、土層之上，所以工程地質師一定要認識岩石及組成岩石的礦物，因為礦物常是岩石命名及分類的主要依據之一，又礦物的種類及性質決定了岩石的工程地質特性。科學研究方法

之一就是把同性質的物質歸為同一類，而把性質不同的物質歸於別一類。因此，工程地質師只要能夠正確的對岩石命名與歸類，他就大體知道該岩石的特有性質了。又如工程師於設計時，遇到斷層帶或順向坡等都要非常小心，而斷層帶或順向坡的認定，也是來自地質學的知識。再者，岩石風化後的產物就成為土壤，但是因為風化的過程係逐漸演化的，所以不同的風化程度常以不同的風化等級來表示；而不同的風化等級就表示不同的岩石強度、不同的孔隙率、不同的透水性、以及不同的壓縮性等。同時，不同的岩石，於風化後會形成不同的土壤；例如砂岩風化後，其產物將以粗粒的砂為主；頁岩或泥岩風化後，則將形成細粒為主的黏土。有些土壤具有遇水膨脹、失水收縮（稱為膨脹性）的特性，因為它含有一種黏土礦物（稱為蒙脫石），遇水時，水分子進入其結晶結構，造成體積增大；失水後，水分子消失，又縮回原來的體積；於是土壤就會出現龜裂的現象。這種反應具有可逆性。

工程地質調查包括工程地質圖的測繪、工址調查、取樣試驗、及現場試驗等工作。工程地質圖是一種將工址的工程地質條件顯示於地形圖上的圖件，其內容包括岩性的分類、岩性在地表的分佈情況、岩層的位態（走向及傾角）、地質構造（褶皺、斷層等）、不連續面的組數、位態及特性等。這是工程地質調查的核心工作，也是工程地質分析的基本圖件。不過，工程地質圖的測繪是屬於地面的調查工作，無法看到岩層往地下延伸的情狀。岩層在地表下的延伸情況完全要依賴學理上的推測，其結果必須採用地下探勘的方法加以驗證，包括地球物理探勘、挖探、鑽探、及其他方法。鑽探除了可以驗證地下地質的情況之外，最重要的是鑽探方法可以取得地下的岩、土樣品，俾便在實驗室內進行物理、水理、及力學試驗，進而了解岩、土層的工程地質性質，並且取得定量的數據，以作為工程師設計的依據。另外，在鑽探的過程中，還可以進行孔內的現場試驗，取得岩體（Rock Mass）的力學數據，以便與實驗室內的樣品試驗結果做一比較。因為岩體內含有很多弱面（即不連續面），所以其強度一般要低於實驗室內的完整（Intact）樣品之試驗結果。再者，鑽探完成之後，其所遺留的鑽孔還可以用於裝設監測儀器，如水位或水壓觀測儀器、沉陷伸縮儀（Extensometer）、傾斜計（Inclinometer）等等，可以作為長期觀測之用。

自然界並無十全十美的工址，實際上每一個工址都有不同類型的缺陷。有些缺陷存在於岩、土層自己的內部，稱為固有缺陷（Inherent Defect）；例如軟弱性、膨脹性、壓縮性、不連續性等。有些缺陷則是外來的，稱為外因缺陷

6 工程地質通論

(Extraneous Defect)。絕大部份的地質災害都是來自外因的，例如落石、崩塌、地滑、及土石流等就是來自重力（地心引力）的影響，且由降雨或地震等所誘發。這些災害都是跟地球與生俱來的；它們無處不在、無時不有；而且有的是既生的，有的是潛在的。既生的災害會一再的在同地復生，這就是地質災害的週期特性；所以調查既生的地質災害，避開其發生地點有時也可以達到防災的目的。

地質災害的發生有其必要條件（大部份都屬於地形、地質、及水文的因素）；如果一地的地形、地質條件非常符合這些必要條件，則其發生災害的潛勢就非常的高；稱為該地具有發生地質災害的**高潛感性**（High Susceptibility）；對於具有高潛感性的地帶，能避開則避之，否則將要冒很大的風險。高潛感性的地帶不一定會發生災害；但是其目前不發生，並不是表示不會發生，而是還未發生；尤其在遭受人為的擾動之後，其發生災害的機率將顯著的增高。如果一地的地形、地質條件不太符合這些必要條件，則其發生災害的潛勢就很低；稱為該地具有發生地質災害的**低潛感性**（Low Susceptibility）；因此，利用低潛感性的地帶，其冒險度比較小。工程地質師以其在地質學上的專業知識及經驗，調查工址的地質條件，然後與發生地質災害的必要條件相互比較，就可以評估該工址發生地質災害的潛感性等級。工程師利用這種潛感性分佈圖，就可以在低潛感性的地帶佈置重要的工程，而避開高潛感性的地帶，以降低風險及工程造價。

在工程的規劃及設計階段，工程地質師所取得的工程地質條件都只是施工之前的初始條件。在很多情況下，於施工階段，這些初始條件將發生很大的變化，如地基的壓密、邊坡的切削變陡、地下水位的上升或下降、或新的地質作用發生等等。這個階段最容易發生與地質因素有關的事故，所以工程地質師在這個階段的角色也非常重要；他主要有三大任務：預警即將發生的災害、調查已經發生災害的原因、以及修正與補充規劃階段所調查的地質資料（Bell, 2007a）。以前在規劃階段的工程地質調查，其結果大都由推測而得，因為證據不足，所以難免有錯。在施工中，則因開挖而揭露了岩、土層的真面目；因為地質師可以直接觀察，所以獲得更多的證據。因此，以前如果推斷有錯的，就應該趁此機會將錯誤修正過來；而以前未發現的，則應該趁此機會加以補充。同時，於獲得新證據之後，就應該重新提出新的**地質模型**（Geologic Model），並且評估是否需要變更設計。施工時，因為擾亂了岩、土體的原有應力

場，所以岩、土層的應力需要進行調整，才能達成新的平衡。在應力調整過程中，如果超過了彈性階段，而進入塑性變形階段，且尚未到達破壞點之前，工程地質師就要提出預警，並且建議如何預防災害的發生。萬一災害發生了，則工程地質師需要調查原因，並且提出對策。由此可見，工程地質師在施工階段的重要性。一個有經驗又機警的工程地質師可以防患於未然。一個沒有經驗或者不負責任的工程地質師可能無法做出預警，因而發生了災變；其輕者可能只是延宕工期，重者可能要變更設計，更嚴重者可能連工址都要放棄掉，其損失何止千萬計。



1.4 工學與理學的融合

工程師以製成產品為目標，最終可以見到實體成品；地質師則以推理為主，他依賴的是想像力，在虛無縹緲中，完全見不到實體。因此，兩者的訓練與思維方式有一些不同；雖然雙方都是利用科學的方法來達成目的，但是最終的產品卻有很大的不同；工程師完成的是一件工程實體，它的規模與尺寸與原先所設計的一模一樣，既看得到，也摸得到；而地質師完成的卻是對一個自然現象的解釋，他的解釋可以有很多種說法，完全視個人的想像力（當然需要推理）或證據的充分度而定；隨著證據的不斷累積，說法可以跟著改變。當然事實只有一個，所以經過不斷的推演，最後還是會定於只有一種說法。這種思維方式，或者學問的方法，工程師會非常不習慣。但是因為工程地質學是工學與理學的融合，所以工程師一定要習慣，而且要理解，地質師在下結論之前，是要經過充分的蒐集證據（即詳細且深入的進行工程地質調查），否則他腦中的地質模式可能有錯。表 1.1 顯示工程師及地質師對工程地質的看法之差異。

我們常說台灣島是位於歐亞板塊及菲律賓海板塊的衝撞帶上，所以會發生地震及活動斷層等現象；這是大至整個地球的視野。工程師則專注於工址（Site）或路線本身；他關心的是這個工址的承載層在什麼深度、承載力多少、沉陷量多少、有什麼缺陷、需不需要地質改良，或者是邊坡穩不穩定、要不要設置擋土牆等等。假定數公里之外的後山有一個土石流的發源地，暴雨一來，將重新啟動（土石流或其他地質災害都有一再重現的特性），且通過或堆積在工址的位置，則工址的地質條件再好，又有何用！所以工程地質調查的範圍絕不能只限於工址；凡是地質因素會影響到工址的安危者都是列入調查的範圍

8 工程地質通論

表 1.1 工程師與地質師對工程地質的看法

比較項目	工程師	地質師
視野	只有工址的範圍	整個地質影響帶
時間尺度	只顧現在	考慮過去、現在、與未來
岩土及地質構造的分佈	只重視垂直向（2D）的變化（尤其是鑽孔處）	同時重視垂直向及水平向的變化，加上時間（4D）
地應力	以重力為主	考慮各種地質力
工作成果	從無到有，其成果為產品（Product），為實實在在的實體	由果追因，其結果為發現（Discovery）某事理，或形造想像的地質模式
解決問題的方法	使用定量的方法	使用定性、或半定量方式
思考邏輯	數理模擬；常問 HOW	想像、推理；常問 WHY

（稱為地質影響帶）；這個範圍有時候可以大到整個集水區。台灣目前尚有不少聚落還定居在土石流的堆積扇上（潘國樑，民國 94 年），有如居住在火山之上一樣；這就是腦中只有現址，而沒有考慮到地質影響帶的威脅之故。

工程師看一個工址只對現狀有興趣，不管它是如何形成的（完全不管它是殘留土、崩積層、沖積層、或是土石流的堆積扇等），更不管工址未來是否會發生改變而造成危險，例如河岸不斷的被流水沖刷，造成岸坡逐漸後退，終於退到基礎的附近，以致基礎被流水淘空；或者是山坡地上的侵蝕溝不斷的向上游延伸，終至淘空路基；或者是岩質的公路陡坡因為岩體內的殘留應力不斷的釋放，因而產生張性裂縫，岩壁遂以板狀的方式逐漸張口，終至影響到岩坡的穩定；或者落石、崩塌、地滑、土石流、活動斷層等地質災害可能會再度復活等等。這些地質作用的速率雖然比較緩慢，但是鐵杵終究可以磨成針，所以地質也是一樣慢慢在改變。地球乃是一個動態的球體，其內外皆然；內部的運動表現於火山、地震、板塊運動、地殼升降等；外部的運動則表現於重力（稱為塊體運動）及水力、風力、冰川、或海浪的侵蝕、搬運、及堆積等。在工程體的有限壽命內，這些作用很可能會影響到工程體的安全。所以地質師看一個工址是要從過去（現在的岩土在過去是如何形成的）、現在、一直到未來，都要考慮在內。

一般而言，我們為了對主體及附屬工程做出合理的配置，通常會對工址

CHAPTER 1 緒 言 9

（建築上稱為**基地**）預先進行通盤的了解，以確定地表下岩土層的延伸及分佈情況，以及是否有地質缺陷（如軟弱土層、斷層破碎帶、溶洞等）。在一般的情況下，工程師對於一個工址的了解，僅限於鑽孔所鑽穿的岩土層。可是在兩個鑽孔之間，可能有土層正好尖滅了（在沖積層中，土層常發生尖滅的現象），未被鑽探所揭穿，所以地面一加上荷重後，可能就產生不均勻沉陷了。斷層破碎帶或溶洞也常被鑽探所遺漏。又岩土層的交界面（稱為**岩頂**，**Rock Head**）呈現各種類型，有的呈水平，有的是斜面，有的則呈犬牙狀，有的又呈石芽狀（岩盤如犬牙般的露出地表），有的則是塊石與土壤的混雜，真的是莫衷一是。如果不調查清楚，或者缺乏岩土層常發生橫向變化的意識（**Sense**），則很可能會對基礎做出錯誤的設計，甚至影響到工程的安全。因為地質師有過這方面的訓練，所以他對岩土層的延伸及分佈，不但考慮到垂直向的變化，而且還會考慮到水平向的變化。

工程師在進行岩土層的力學分析時，它考慮的外力係以重力為主，頂多再考慮地下水的壓力及浮力。而地質師考慮的則更多，我們可以統稱為**地質力**。地質力可以分為**內因力**及**外因力**兩大類。**內因力**來自地球的內部，以地殼運動力、構造作用力、變質作用力、地震力、火山爆發力等為代表；這些力的來源其實都是來自板塊的運動，所以可以統稱為**板塊運動力**。**內因力**一直施加於地球，即使岩體露出地表，其體內仍然殘留著原始應力。一般而言，原始應力以水平應力為最大；一個岩質邊坡的坡腳處（即坡趾部），其最大剪應力約相當於原始水平應力的3倍左右；水平剩餘應力的有無可以使坡腳的最大剪應力相差達15倍以上，所以水平剩餘應力對邊坡穩定性的影響遠大於垂直向的重力。在邊坡的自由面上則產生很大的釋放應力，造成平行於坡面的張性裂縫；以山岳的河谷岸坡及公路邊坡最為顯著。**外因力**來自於重力、水力（包括地表水及地下水）、風力、冰川力、浪力等。如果以力的大小而論，**內因力**遠大於**外因力**；不過，如果以對工程體的威脅性而論，則**外因力**遠大於**內因力**。

一個多方位的工程地質師需要具備跨領域的知識，他不但要有嚴格的地質學訓練，他還需要有工程方面的基本概念與認識；同時他需要將地質學的定性思考，融合工程科技的定量思維；他還需要有力學方面的訓練。反過來，一個具有工程背景的工程師，想要踏入工程地質的領域，他需要先培養科學的素養；例如他思考問題時，需要用**推理**（**Reasoning**）的方式；即凡事有果必有因，他必須追根究柢的去探查及推論原因何在。

10 工程地質通論

我們且舉一個滑動的例子，來說明工程師與地質師對付（Approach）這個問題的不同思維。工程師首先會計算滑動體的重力，然後再求重力在滑動面上的分力；再將此分力與岩土體的抗剪強度相比，如果此值大於 1，就證明會發生地滑。在整治的策略上，不是減輕滑動體的重量（例如將滑動體挖除一部份），就是增加岩土體的抗剪強度（例如利用擋土牆）。地質師因為沒有受過力學的訓練，所以他不會採取定量的分析法。他會先查明岩土體內部的性質，查看有哪些因素會造成滑動（例如他可能找到土層內有膨脹性的黏土礦物、或者岩土層內存在有弱面），然後他又查到滑動體外有地表水灌入滑動體內；他所提出的對策可能只要斷絕地表水的灌注就可以解決問題了。他的邏輯基礎是先找出原因，再將原因去除，問題就可以迎刃而解了。從這個例子可以看出，工程師對付問題的方法是採取抗拒的方式，也就是硬碰硬的方式。而地質師則採取疏導的方式，也就是以柔剋剛的方式。根據很多案例的處理經驗，最好的方法還是要採取折衷的方式，也就是以軟硬兼施為上。



1.5 本書的內容與使用法

本書分為三大篇，一共 22 章，遠超過一個學期 3 個學分的教材份量。

第一篇為**基礎篇**，以地質學為基礎。其內容包括礦物、岩石（包括火成岩、沉積岩、變質岩、及鬆散堆積物）、及構造（包括褶皺、斷層、節理及其他不連續面）。雖然教材以傳統的地質學為本，但是特別著重其在工程方面的應用，例如每一種岩類都有介紹其工程地質性質，而且還介紹了褶皺、斷層及不連續面與工程的關係，所以仍然值得地質專業人士的參考。尤其第六章特別介紹鬆散堆積物，如殘留土、落石堆、崩積土、沖積土、及問題土壤等，這些都是一般地質學教本所忽視的部份。

第二篇為**應用篇**，即將地質學的基礎知識應用於工程地質。該篇主要偏重於工程地質的調查與分析。首先介紹岩體的工程特性（包括物理的、水理的、及力學的），以及岩體的常用分類方法；開始由第一篇的定性思維逐漸轉為第二篇的定量思維。地形圖及地質圖的分析是特別為非地質專業人士而寫的；用以導正鑽探即是工程地質調查的錯誤觀念。尤其地質圖是工程地質調查最為珍貴的參考資料；如果會讀地質圖，等於免費獲得前人經過數年的辛苦調查所累積下來的成果。地下水與工程（第 13 章）是很重要的一章，書中特別強調地

下水對工程的不利影響，以及如何進行防水及防滲的問題；廣泛觸及一般的，以及邊坡、基坑、地下工程、與壩基等工程的防滲方法。第 14 章特別介紹地質災害，內容包括落石、崩塌、地滑、土石流、地盤下陷、活動斷層、地震、流水侵蝕等項目。這些災害都是工程師所欲防治的天然災害，它們的威脅可以一直持續到工程體壽終正寢為止。該章將這些災害的辨認、調查、預測、及防治方法做了一個很有條理的歸納。工址調查當然是很重要的一章；作者將衛星影像判釋列為調查的方法之一。由於遙測科技的快速進步，目前衛星影像的地面解像力已經可以精密到數公尺，甚至到 70 公分，所以利用衛星影像來進行工程地質調查已經達到成熟的階段了；尤其對於地質災害的清查可以進行全面性的調查，這是地面調查所無法辦到的（地面調查是點或線的調查，遙測影像調查則為面的調查）。第 16 章也是專門為非地質專業人士而寫的；該章特別從宏觀面介紹台灣的板塊模式，以及因為菲律賓海板塊與歐亞板塊的碰撞結果，在台灣所造成的特有地質現象，例如地震、活動斷層、火山活動、混同岩、雙變質帶等；它們的分佈與板塊的運動模式息息相關。該章還對台灣的地質做了一個扼要的介紹。

第三篇為**實務篇**，係針對特定的工程，分別說明應該考慮的工程地質課題，以及工程地質的調查方法，還說明應該如何選址或選線。該篇所提到的工程種類，廣泛的包括了建築基地（含高層建築）、道路、橋樑、隧道、大壩、水庫、衛生掩埋場（含核廢料處置）等多項。最後則以發生過事故的案例做為本書的結束；內文特別強調其地質背景、發生事故的地質因素、以及處理的對策。案例涵括國內外，有地下鐵與基坑的管湧及流砂災害、隧道的湧水、被地震斷層錯斷的大壩及水工隧道、地滑、土石流等；還有一例是因為地質師的經驗不足，其在從事工程地質調查時，沒有辨認出原來形成於海溝（Trench）中的混同岩（Melange），以致調查結果不正確；施工時遇到完全沒有預料到的岩層。因此，只好重新調查及評估；甚至連 Karl Terzaghi 及美國地質調查所的地質師都親自出馬。

由於本書的編寫係以土木、水利、營建、水土保持、及地質等各領域的學生或從業人士為對象，所以談論的主題非常的廣泛；有些主題可能只適用於某些特定領域，有些主題則可能不適用。因此，不同的領域最好各取所需；將其不適用的部份予以略過。如果將本書列為教科書時，其應教授的章節則完全由老師自行斟酌，視實際需要而取捨；老師覺得學生應該懂得什麼，就擷取施教