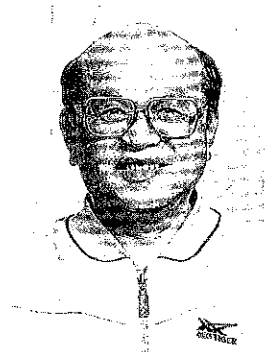


地工技術

贈言

地下水的地工面

吳建民



台北市人，民國23年2月21日生，民國45年台灣大學農工系畢業，民國47年預備軍官役後即就職經濟部水資源統一規劃委員會，負責水庫、河川泥沙問題之研究迄今。其間曾於民國49年赴台大土木研究所進修二年，赴印尼協助水庫及防洪工程之規劃、設計二次，赴泰國亞洲理工學院任教一年，並屢次代表國家出席國際水資源會議，任國際水理學會技術委員、亞銀水資源顧問等。

現任經濟部水資源統一規劃委員會總工程師，兼台灣大學土木工程系教授，聯合國1992年國際水資源會議技術委員等職。

服務基層期間以河流泥沙問題涉及之水源問題為研究之重點，並旁及地工問題；負責規劃工作後研究重心有180度之轉移，現以台灣水利史及水利工程之考古為中心，對於平埔族、荷蘭人、鄭成功、清朝及近代工程界在台灣地區的貢獻與歷史等頗有心得。

水土資源為現代人類享有的最基本而貴重的資源；尤以地下水，它具有構成地盤的土地環境基本要素的性格，同時也兼具有水資源的性格。

一般而言，地下水的水資源形象較強，因此一般工程界討論地下水問題時，以往均以水文、水理學的觀點探討問題，而鮮少用地工學門或科技的觀點處理地下水開發所引起的水土資源平衡問題；尤以最近各界均有因地盤下陷問題的嚴重化，而有地下水是負資源的過敏症與恐懼症。

作為水資源的地下水，具有較地表水安定的性格。人類為了利用地表水，已費盡各種努力，但由於水資源之日趨稀有，對於水資源的利用，實有重新考慮的必要。古代為調節、利用地表水，都必需有強大的公權力作後盾，堯舜之際如此，大禹之世更是

如此；有時甚至借重宗教神權的保佑；這種狀態到今天科學昌明時代，仍舊如此，救旱祈雨，中外一致。反之，地下水的開發，在過去並沒有這種必要性。只要探得地下水泉源，隨時都可獲得甘泉，既不要上帝的保佑，也不需神棍的保護。

事至二十世紀人類競相開發地下水後，全球各界均受地盤下陷、地水乾涸、水質惡化等弊害的困擾。這種問題的瞭解與解決，實有賴地下水水文界、地下水水理界、地質界與地工界各跨科技學問專家學者的通力合作。地工技術雜誌社一成立就推動這種跨科技的學術交流，對於台灣地區地盤下陷防治頗有貢獻，今後宜繼續加強推動，以彌補地下水界對於地工技術認識的不足。

1. 地下水的基本性格 - 環境要素

地下水的最基本而以往被忽略的性格是：它是構成“環境”的一大要素。地下水存在於地底下，雖然是視覺之不及，而容易被關心環境人士所忽略，但它的的確是構成地盤的重要要素。構成地工科技基本科學的土壤力學裡，都是假設土壤中，本來就有水的存在，而甚少去討論水的存在及來源問題；地下水與土壤粒子是構成地盤的重要要素，如地盤中沒有水，土壤力學將可簡化甚多。

土壤力學中水、地下水的重要性，將出現於各種問題上，其中涉及環境問題的當以有效應力最為重要。在土壤中的水-土系統中，岩石與水的重量，在時間上為一定。因此總壓力的變化需滿足 $d\sigma_T = 0$ 的條件，亦即有效應力的變化與水壓的變化相等，即 $d\sigma_e = -dg$ ，這是一般共認的基本力學特性。在這種情況下，若地下水壓力增加時，有效應力就相對等量減少。即系統中各點的有效應力的變化，實質上是受各點水頭的變化所支配，而有效應力的增加所導致的含水層本身體積的變形是不可逆(irreversible)的過程；因此在地表上就造成地盤下陷現象。這就像汽車與輪胎，輪胎洩氣後整個汽車也下降了；亦即在地底中，與土壤構成地盤的地下水，是具有地盤的緩衝墊層的特性，也有彈簧的作用。雖然加諸之於地下水的人力有大小的分別，但原則上地層都會有反應。

具有環境要素特性的地下水，與地表附近的土壤水份（非飽和層水份）有共存的現象，同時貢獻於大自然的調和；地下水的存在也確保了大型植物及多色多樣的微生物的生存與繁殖，同時也是維持植物生產，農耕生產，畜牧生產等自然及人工生態體系的根源。

自然界的生態體系基本上是保持動態的平衡。在平衡體系中如有人為的作用力，自然將隨著新的條件，作新平衡的調節。如果既存的生態體系不容許

破壞時，或現場將招致大變化時，地下水的利用當受到相當程度的限制。在情形嚴重時，有時甚至需全面禁止地下水的利用。但如果利用地工技術加以改善時，地下水仍就可繼續開發利用，足見地工技術在地下水環境要素控制上的重要性。

當然有些問題是地工技術或科技所無法解決的，如地下水的露頭，如泉水或池水，這是自古人類聚殖的據點，神話或傳說中湧泉是人類生命的泉源，如果過份開發地下水，以致水源乾涸，那是地工技術所不及的。他如因地下水乾涸導致的河川乾旱、景觀變遷和水污染惡化等，就需要另圖他途了。至於河口附近鹽淡水交界面的變化對於生態體系亦有相當的衝擊，為了減輕這種衝擊，地下堰等地工技術也發揮了相當環境保護的用途，這些都是為了明天台灣地下水環境的保護，地工界可以貢獻的新天地。

2. 地下水的基本性格 - 水資源

地下水作為水資源具有各種優點，已見於各級學校的教科書；它的利用歷史可謂與人類的發生具同樣的悠久性。地下水除以水井形態廣泛被利用外，在伊朗、新疆等地區又被利用坎兒井等方式成為沙漠的寵兒。這種特殊的地下水古代構造物證明，只要地下水的利用方式正確，地下水確是一種永續的水源。

地下水為自然界水循環的一部份，一般地表水的流速以 cm/sec 計，但地下水則以 cm/day 或 cm/yr 的幅度緩慢移動；因此循環的週期地表水以每週1回計，而地下水則緩慢至數十年一次。既然地下水是水文循環的一部份，當然意味著地下水有它的補注源（涵養域）與流出域，而有自然的流動。最近非洲及北美曾利用碳十四定年法測出很多深層被壓含水層的地下水年代達數萬年，台灣大學地質研究所也測定台北盆地淺層松山層的地下水年代也超過3000年以上，北港地區的地下水也達上萬年以上，由此等

資料反算地下水的流速在(50cm ~ 1 m) / yr的程度。這證明地下水並非停滯在地中，但是流動非常緩慢。地下水利用時，抽水量如能維持在地下水天然的流動量以下時，理論上地下水可作為永續水源繼續利用。因此作為水資源利用的地下水首先需調查地下水的自然流動量。

自然流動量需測定地下水的斷面積、空隙率、流速及流向等，但因地下水水頭的分佈是三度空間的，因此測定時需化費相當時間與經費。實用上就以補注量或涵養量代替。就平均狀態而言，兩者雖相等，但補注量的實測也相當困難，致實用上需注意其可靠性，而需給予某種程度的安全係數。除非考慮地下水的人工補注，地下水的利用理論應以上述自然流動量或天然補注量為上限。地下水的會被誤用，原因在於地底下的地下水，除上述自然流動量外，尚有龐大的蓄藏量(賦存量)，就以台灣地區而言概估的地下水賦存量達1080億m³，足夠台灣地區使用數十年，但補注量則每年在40億m³的程度。實際上的地下水利用，在某一局部地區抽取龐大的地下水，它的抽水量不但超出補注量，往往也侵犯了賦存量；這種抽取“礦水”的結果就是導致海水入侵或地盤下陷等無法挽回的公害的原因。

3. 地下水的管理與地工技術

地下水的管理受上述地下水基本性格 - 自然環境構成要素及支持文明生活的水資源的控制，因此需要在這二大限制條件下作利用的管理。以現在已知的補注量每日1mm計算，1km²面積的日補注量僅能及1000m³，這個數值小於實際開發量的1個小數點。因此如要使地下水為永續的水源，在面積上需分散使用，時間上要限制使用，在空間上需綜合地表水與地下水的聯合運用。甚至考慮地下水的人工補注，而地工技術也將成為地下水利用的寵兒。地下水補注量的推定有①氣候性水收支平衡計算②水分計補注量實測③通過量與循環速度補

注量④水收支式⑤Harding method⑥Hill method等。此等方法均以水文為出發點，今後進一步，提高管理上之需要可綜合水文及水理之綜合模式，如利用：

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + \omega(x, y, t) - w \alpha \{P(x, y, t) - E(x, y, t)\} \dots \dots \dots (1)$$

進行數值計算，利用P(x,y,t) E(x,y,t)及實測水頭資料檢定T_{xx} T_{yy} S及α等參數，求地下水的補注量作為抽水管理的限制值。上式中S為蓄水係數，ω為抽水量，P及E為降水及蒸發量，α為補注率。

儘管上述數學模式的應用可提高地下水利用的管理，但卻無法增加地下水的利用量。地工技術及科技的利用卻可提高利用量，使地下水的利用朝向新的里程碑，如地下堰的利用便是一例。

(1) 被壓地下水層中地下水庫之蓄水效果

地下水庫可利用於自由及被壓地下水含水層中。圖1示被壓地下水含水層中地下水庫之模式示意。

如圖1所示如將座標系(X,Z)之原點取在地下堰之上端點，水平方向作X軸，鉛直下方向取Z軸，並假定流量為定量流時，在未建堰前之水位可用實線表示，而建堰後，在Z=0面之水位則可由點線表示之，即在X=0處將發生不連續現象；又在Z=H之底面處，其水位(壓力線)則可用圖中之

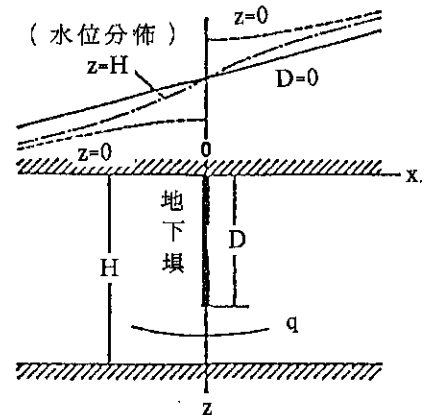


圖 1 受壓含水層中之地下水庫 (石原)

鎖線所表示之，圖中在X=0處之水位坡度為最大。

為檢討地下填深入含水層之深度與地下水位之關係，可用等角轉換(Conformal mapping)法，將(X,Z)平面轉換為(φ, ϕ)平面，得：

$$\omega = \frac{2H \cdot I}{\pi} \cosh^{-1} \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \frac{t}{2H})}{\cos(\frac{\pi}{2} \frac{D}{2H})} \dots\dots\dots (2)$$

式中， $\omega = \varphi + i\phi$ ， $t = X + iZ$ ，而 φ 為流勢函數，I為地下填建造前之水位坡度。

由(2)式計算所得Z=0及Z=H處之水位(壓力面)分佈詳如圖2。圖中D/H=0之直線係表示無地下填時之地下水壓(位)線，其坡度為I。

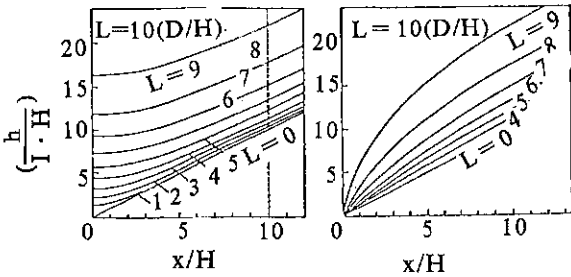


圖 2 (a) Z=0 面之地下水位分布 (石原)
(b) Z=H 面之地下水位分布

在(X,Z) = (0,0) 點上游之地下水位上升量 Δh_0 ，與X=∞處之地下水位上升量 Δh_∞ 之關係亦可由(2)式計算所得

$$\Delta h_0 = \frac{H \cdot I}{\pi} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{1 - \cos^2(\frac{\pi D}{2H})}}{\cos(\frac{\pi D}{2H})} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta h_\infty = \frac{H \cdot I}{\pi} \ln \left[\frac{1}{\cos(\frac{\pi D}{2H})} \right] \dots\dots\dots (4)$$

在(X,Z) = (0,0) 點下游地下水位之下降曲線與上述上升量恰為對稱，故下游側地下水位降低量為 Δh_0 ，而X=-∞處之地下水位降低量亦為 Δh

由該二式知地下填之長度D增加時，地下填上下游之水位差將急速增大，而地下水庫之蓄水效果將提高。

(2) 自由含水層中地下水庫之效果

自由含水層中建造地下填後，地下水水流之特性如水位分布及流線形

狀等，甚難用數學方式求解。一般可用被壓含水層之數學解作近似之推定，或利用模型實驗及數值解析等作進一步之分析。

根據Pavlovsky氏之古典地下水水流剖面理論(Harr,1962)，假定地下水水流之各點均滿足Dupuit之假定時，地下填之水流情況可用圖3之示意圖模式化之。圖中H為未建填前地下水之水深，地下水之坡度為I。如以地下填填址為原點，向上游取X軸，即地下水位變化後之關係式為：

$$\Delta h_0 - \Delta h = I \cdot X - H \ln \frac{\Delta h_0}{\Delta h} \dots\dots\dots (5)$$

式中 Δh 為因地下填所致地下水位之變化量， Δh_0 為填址之地下水位變化量。

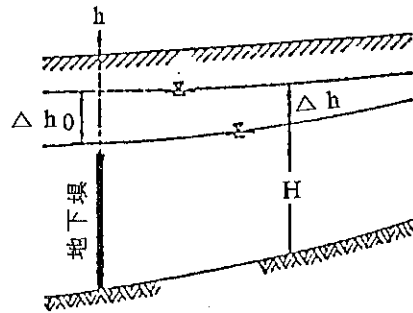


圖 3 地下水位變化說明 (石原)

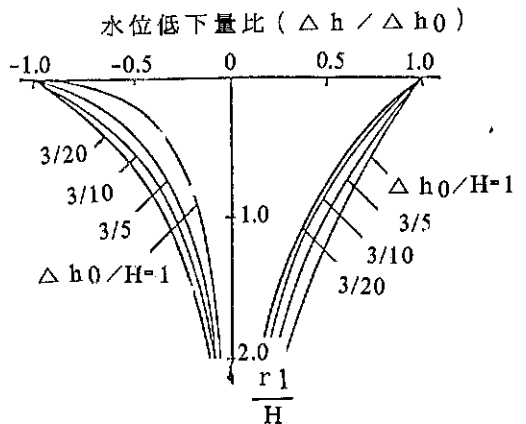


圖 4 地下水位變動解析結果 (石原)

今如以 $\Delta h_0/H$ 為參數，由該式計算 Δh 與X之關係時，其成果如圖4所示。在此種定流量情況下且在同一 Δh_0 情況下，H愈大或I愈小，則地下水之蓄留量將變大。

(3) 自由含水層中半透水堤對於蓄水之效果

地下堤可為透水性，亦可為半透水性遮水壁，根據佐藤氏(1981)之推導，遮水壁建設前後其水理變化可模式化如圖 5，並用(6)至(7)式表示之。

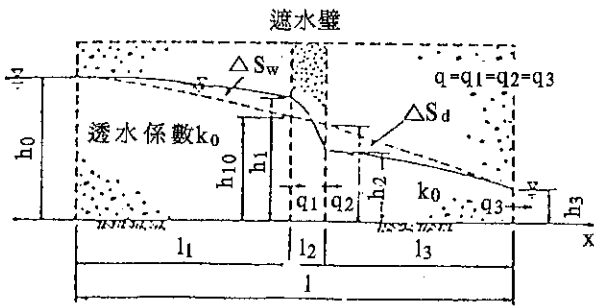


圖 5 遮水壁對地下水之影響

$$\frac{q}{q_0} = \left\{ \frac{l_1 + l_3}{l} + \frac{k_0}{k} \cdot \frac{l_2}{l} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{h_1}{h_0} = \left\{ \frac{\frac{l_2 + k_0 l_2}{l} + \frac{l_1}{l} \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^2}{\left(\frac{l_1 + l_3}{2} + \frac{k_0}{k} \cdot \frac{l_2}{l} \right) \left\{ \frac{l_1}{l} \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^2 + \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) \right\}} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{h_2}{h_0} = \left\{ \frac{\left(\frac{l_1}{l} + \frac{k_0}{k} \cdot \frac{l_2}{l} \right) \left(\frac{h_2}{h_0} \right)^2 + \frac{l_3}{l}}{\left(1 - \frac{l_1}{l} \right) \left(\frac{h_2}{h_0} \right)^2 + \frac{l_3}{l} \left\{ \frac{k_0}{k} \cdot \frac{l_2}{l} + \frac{l_1 + l_3}{l} \right\}} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

(6)式表示遮水壁建設後單位寬流量 q 與建設前流量 q₀之比，(7)及(8)式為遮水壁上下游水位之變化關係式。由此三式可推算地下堤建設前後取水量增強之效果。

(4) 地下水庫之特性

地下水庫與地表水庫之比較如下：

- 地表水庫之水面曲線形成時間甚短。地下水庫則時間甚長，尤以自由含水層為然。因此地下水庫在地下堤附近雖已滿庫溢流，但上游部份在長期間仍有地下水之儲蓄作用。
- 地表水庫如欲提高蓄水量，需提高堤高，但在地下水庫中由於其背水曲線影響範圍較大，故地下堤之高度不一定要高。

- 地下水庫無所謂淹沒區問題，地表如無污染問題仍可照舊利用。
- 需水量少時之無效放流可藉水庫儲蓄，亦可減低地下水水位洩降之災害。
- 地下堤之結構要求不及地表堤，工程精度可較低，無地表水庫崩堤之安全問題。
- 地下堤可視效果之發揮程度分期施工。

地下水循環之流速甚為緩慢，地表水之流速一般在 cm/sec 之階，而地下水則在 cm/day 至 cm/yr 之幅度，因此循環之速度地表水以週為單位衡量，而地下水則以年或數十年一次為單位。由於地下水流動之流速緩慢，故地下水庫建造後雖然有上述增加儲蓄量之效果，但所需要之時間相當長，且地下水庫之建造可能減少流量，實際抽水時，仍應有相當嚴格之限制。又地下堤下游地區之地下水位亦有洩降之現象，規劃時宜綜合上述因素作詳細之環境評估。

地工科技在地下水中的應用不勝枚舉，就澎湖赤崁地下水庫的成功例而言，我國的地工界已邁進水資源管理的高科技化，但望地工界的不斷投入，使臺灣的地下水能有挽回新生命的一天。