

潮汐對海水入侵之影響

Tidal effects on Seawater Intrusion

計畫編號：NSC 87-2211-E-002-054

執行期間：86 年 8 月 1 日~87 年 7 月 31 日

主持人：蔡丁貴

執行機關：台灣大學土木工程學系

一、中文摘要

本研究計畫之目的在於以實驗模擬潮汐對雙相液體（海水與淡水）的地下含水層之影響，由於潮汐之作用於海水入侵址部，淡海水交界面及地下水自由液面位置及相位將產生變化，本計畫研究結果可以作為理論解及數值解驗證之基礎。

本研究利用不相容的兩種液體使之產生一個明顯交界面；假設非受壓含水層為均質、等向性且完全飽和；含水層的傳導係數及儲水係數不隨管壓水頭變化而有所改變；含水層厚度遠小於其水平之長度和寬度；潮汐為一微小擾動，且交界面、自由液面受潮汐之擾動亦很小。

基於上述假設，來從事實驗模擬，經由實驗可獲得不同距離的自由液面水位、淡海水交界面位置隨時間變化之情形，並經由計算得到地下水液面變化與交界面變化之幅度與潮汐振幅之相對關係及相位差。本實驗之量測數據可提供理論解析及數值模式預測之依據，並應用至現場以提供沿海居民引用地下水之參考。

關鍵詞：潮汐、自由液面、淡海水交界面、海水入侵址部

Abstract

The objective of this proposed research is to experimentally study tidal effects on two-phase (freshwater and seawater) groundwater flows. The results of this research will provide measured data for verification of analytical and numerical solutions to movements of seawater intrusion toe, freshwater and seawater interface and free surface fluctuation in the aquifer.

Two immiscible fluids are employed to form a

sharp interface in this proposed research. Unconfined aquifer is assumed homogenous, isotropic and saturated. Its conductivity and storage coefficient do not change with pressure head. The thickness of aquifer compared with its length and width is assumed small. Fluctuation of seawater intrusion toe, freshwater and seawater interface and groundwater free surface due to tidal effects is also assumed small. It is intended to obtain a relationship between toe position, interface and free surface; and tides in term of amplitude amplification and phase lag. Results of this research will provide experimentally measured data to verify analytical solution and numerical results for further prediction of tidal effects. With meaningful verification analytical solutions and/or numerical results can then be applied to evaluate groundwater usage in coastal areas.

KeyWord: Tides, Phase lag, Free surface, Seawater and freshwater interface, Toe of seawater intrusion.

二、研究動機與目的

臺灣地區雖處於雨量充沛之亞熱帶，但時間上降雨多集中在四月到七月之間，且空間上，臺灣地區山高河短，截蓄不易；因此，即使年雨量高達 2510 公釐，卻因為時間、空間上的缺陷，而時時感受到缺水的威脅，加上工商業發達，經濟繁榮，人口增加，生活品質提高等因素，使得水資源的永續利用越來越受重視。

由於地下水取得容易，成本較地面水低廉，加上水權管理不易，追查困難，因此過度開發的情況日益嚴重。根據水資會於民國七十人年的統計，臺

灣地區有水井十二萬餘口，年抽水量達十二億立方公尺，使用量佔年度總用水量之 22.3%，為水庫調節供應量的 1.3 倍，遠超過年地下水補助量四十億立方公尺。而這還只是檯面上的數據，面對私取地下水資源層出不窮的情形，地下水不當使用的情況應該是更嚴重的。尤其是在沿海地區，養殖業興起之後，在地面水不足的情形下，轉而抽取地下水，地下水超抽的結果，是造成地層下陷、海水入侵、水質污染、土壤鹽化等問題。地下水和地面水不同之處在於其埋藏地下，水質監測不易，缺乏自淨能力，一旦水質和水量受到破壞，要再恢復就很困難，即使付出極大的代價也難完全恢復。

面對臺灣地區乾旱問題日益嚴重的情況，不但農業用水、工業用水受到季節性停水的命運，連民生用水也飽受斷水威脅。在急迫需水的窘境中，政府於是大規模興建水庫，企圖攔蓄原本已面臨季節性枯竭的河川水源。此舉雖可即時解決短暫的缺水問題，從長時間的角度來看，卻有破壞生態，降低地下水位等後遺症；且水庫蒸發量大，有淤積問題，管理問題，也有停止使用後的處理問題。反之，近年興起的地下水庫，則是配合自然環境與地形，做適度而永續地開發。將水源儲藏在地下，除了避免以上興建水庫所帶來的缺點外，也可配合水庫在枯水季做調節供水量的工作。美國加州便有成功的經驗。

本計畫的研究動機便是試圖去探討在海水潮汐影響下，地下水位的變化，淡、海水交界面的位置和其隨時間運動的情形、地下水淡水層的厚度等。利用對這些物理現象的瞭解，使我們對地下水運動有更深的認識，進而永續而有效地利用它。

三、研究方法

假定海水與淡水不相混合，且均為不可壓縮之液體，含水層為均質且等向性；含水層的傳導係數及儲水係數不隨管壓水頭的變化而有所改變；孔隙介質為完全飽和；含水層厚度遠小於水平長和寬；潮汐為一微小擾動，且交界面、自由液面受潮汐之擾動亦很小。由於現場資料及實驗資料十分缺乏，因而本計畫將以砂箱模型(Sand tank model)來試驗模擬海水入侵線受潮汐影響所引起之交界

面上升情形，以作為解析解及數值模式驗證之用。

A、理論分析：

本研究計畫基本假設如下：

1. 含水層中淡、海水不互溶，因此存在著一明顯的交界面。
2. 含水層之孔隙介質具均質性(homogeneous)，流體具等向性(isotropic)且含水層的水力傳導係數(Hydraulic conductivity)和儲存係數(Storage coefficient)不隨管壓水頭的變化而有所改變。
3. 各孔隙介質到達完全飽和的狀態，且不考慮毛细現象。
4. 假設含水層為淺平，即水平長、寬遠大於垂直厚度，則可假設入流、出流為水平流(Horizontal flow)，如此，水層在垂直方向上有相同勢能，此即杜布假設(Dupuit's assumption)
5. 假設潮汐為微小擾動，同時，自由水面和淡、海水交界面之擾動亦很小。

B、控制力程式推導

地下水運動實際上是一個很複雜的問題，但為了使問題在數學上容易處理，必須對問題加以簡化，因此在解題之前須做一些假設。對流體特性而言，通常假設流體為理想流體，亦即流體為均質且為不可壓縮之勢流(Potential flow)，不考慮流體本身的黏滯性及外在地球旋轉之效應。對潮汐而言，為簡化分析起見，考慮單一成分潮波，假設此分潮波為線性之微小振幅波且為週期固定之單頻波(Monochromatic waves)，使問題可利用數學解析或用數值方法求解。

我們考慮一個非受拘含水層，取單位面積上的方柱來分析，在淺平界面流(Shallow interfacial flow)的假設及杜布(Dupuit - Forcheimer assumption)的水平流假設下，利用質量守恆可推出下式：

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - N = -S \frac{\partial f}{\partial t} \quad (1)$$

其中，下標 x 和 y 代表在 x 及 y 方向上的分量，則代表水面的水力水頭(Piezometric head)， S 為

儲存係數(storage coefficient), N 則為地表水入滲到地下的入滲率。

本研究擬將流量 Q 及水力水頭 分為長時間尺度及短時間尺度兩部份即：

$$Q = Q_l + Q_p \quad (2)$$

$$f = f_l + f_p \quad (3)$$

將式(2)及(3)代入(1) 則可得到：

$$\frac{\partial Q_{lx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{ly}}{\partial y} - N = -S \frac{\partial f_l}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q_{px}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{py}}{\partial y} - N = -S \frac{\partial f_p}{\partial t} \quad (5)$$

方程式(4), (5)分別表示長時間尺度及短時間尺度的質量守恆方程式。

沿岸地下水層由於海水入滲的關係, 形成淡、海水交界面, 在簡化的條件下, 我們將地下水層分成海水層及淡水層, 淡水層上接地下水位面, 下至淡、海水交界面; 而海水層厚度則為自淡、海水交界面至不透水層壁面。則各層水力水頭可表示如下

$$f_f = \frac{P_f}{g_f} + Z_f, \quad f_s = \frac{P_s}{g_s} + Z_s \quad (6)$$

由杜布假設, 可知淡水水層中垂直斷面上任兩點的水力水頭均相等, 海水水層中亦復如是。但在交界面呈現不連續現象, 這是由於基於穩態的假設, 壓力必須於交界面上連續所致。 P_f, P_s 表壓力, g_f, g_s 表液體比重。沿著淡、海水交界面上壓力 $P = P_f = P_s$ 且 $Z_f = Z_s = Z$, Z 是淡、海水交界面的高程, 則交界面方程式可表示成：

$$g_b f_b - g_f f_f = (g_b - g_f) Z \quad (7)$$

假設

$$\begin{aligned} f_f &= f_s + f_t \\ f_b &= f_{bs} + f_{bt} \\ Z &= Z_1 + Z_2 \end{aligned} \quad (8)$$

其中 f_s, f_{bs}, Z_1 為穩態項, f_t, f_{bt}, Z_2 為暫態項, 將式(8)代入式(7), 並將其分成穩態及暫態項, 可得到暫態方程式如下：

$$f_{bt} = \frac{g_f}{g_b} f_t + \frac{g_b - g_f}{g_b} Z_2 \cong \frac{g_f}{g_s} f_t \quad (9)$$

若考慮淡水密度則第二項遠小於第一項, 則第二項可略去不計。再者, 由達西定律(Darcy's law)：

$$Q_{px} = -k_f h \frac{\partial f_f}{\partial x} - k_s Z \frac{\partial f_b}{\partial x} \quad (10)$$

$$Q_{py} = -k_f h \frac{\partial f_f}{\partial y} - k_s Z \frac{\partial f_b}{\partial y} \quad (11)$$

k_f, k_s 分別代表淡水水層及海水水層的水力傳導係數, 而 h 代表淡水水層的厚度。水力傳導係數 k 可以表成[Nutting, 1930],

$$k = \frac{\kappa g}{n}$$

其中, κ 為內在滲透係數(Coefficient of intrinsic permeability)和土壤介質的特性有關; 而 ν 則為流體特性, 稱為動力黏滯係數(Dynamic viscosity)。所以, 比較 k_f, k_s , 假設土壤特性相同, 則 $k_f = \frac{n_s}{n_f} k_s$, 則式(10)可表示如下：

$$Q_{px} = -k_f \left(h \frac{\partial f_f}{\partial x} - \frac{n_f}{n_s} Z \frac{\partial f_b}{\partial x} \right) \quad (12)$$

將式(8), (9)及 $h = f_f - Z$ 代入式(12)且假設穩態解在 x, y 方向變化極小, 則式(12)可表示如下：

$$Q_{px} = -k_f \frac{\partial f_t}{\partial x} \left[\left(g_f - \frac{n_s}{n_f} g_b \right) \frac{Z n_f}{g_b n_s} + f_f \right]$$

此處, 我們若取 r_b 為 1030 kg/m^3 及 r_f 為 1000 kg/m^3 以及在 20°C 下 $n_f = 1.09 \times 10^{-5} \text{ (ft}^2/\text{sec)}$, $n_s = 1.14 \times 10^{-5} \text{ (ft}^2/\text{sec)}$ 則(13)括弧內的第一項便可表為 (0.028ζ) 。而且 ζ 的量小於 ψ_t 所以, 即使是在海水水平面和陸地交接點上, ($Z = f_f$), 第一項比第二項仍只為 0.028。因此, 可忽略第一項, 同時, 由(8)式假設暫態項之量遠小於穩態項之量, 即 $f_f \cong f_s$ 則(13)可改寫成

$$\begin{aligned} Q_{px} &= -k_f f_l \frac{\partial f_t}{\partial x} \\ Q_{py} &= -k_f f_l \frac{\partial f_t}{\partial y} \end{aligned} \quad (14)$$

則質量守恆力程式可表示成：

$$\frac{\partial}{\partial x}(f_t \frac{\partial f_t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(f_t \frac{\partial f_t}{\partial y}) = \frac{S}{k} \frac{\partial f_t}{\partial t} \quad (15)$$

式中 ψ_t 為短時間尺度的非穩態項，在短時間尺度下假設潮汐為做簡諧運動的波所組成，取其中一個週期的波即

$$f_t = f e^{-i\omega t} \quad (16)$$

其中 ψ 表暫態項振動振幅， ω 表角頻率，代入(15)則可得：

$$\frac{\partial}{\partial x}(f_t \frac{\partial f_t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(f_t \frac{\partial f_t}{\partial y}) = \frac{i\nu S}{k} \frac{\partial f_t}{\partial t} \quad (17)$$

四、實驗方法：

1. 模擬液體之選擇：

由於淡水與海水不相容、兩者密度及黏度相近之假設，因而所選擇之液體必須符合上述三種特性，經費會支持的計畫一抽水造成海水上揚之研究(三)，已經成功的找到兩種混合液體即工業酒精與要用酒精混合液、無味溶劑與正庚烷混合液可滿足上述三項條件。此兩種混合液不相溶；密度分別為 0.786 及 0.728；黏度分別為 1.21cp 及 1.05cp 在攝氏溫度 20 度下，經換算求得水力傳導係數比為 1.03，可符合本實驗需求。

2. 建立模擬潮汐之儲水池：

3. 量測設備之建立：

本實驗主要蒐集資料為淡海水交界面位置、自由液面位置、勢能等，液面及交界面位置之量測，擬利用波高計進行之，擬改變波高計感應器將其埋在含水層中來測定界面之位置，勢能之量測擬利用差壓計來測得，資料收集部份利用本所水文實驗室現有的資料蒐集器 CR-10 以及 Ucam 20pc 來進行。

4. 本研究預計擬完成潮汐變化對淡海水交界面、地下水位及海水入侵趾部之影響。

五、研究結果

本年度計畫受限於經費不足而無法順利進行實驗，僅能就數學理論先行推导出控制方程式，並求解出其解析解。

連續幾年來致力於爭取經費進行地下水的基礎研究(實驗模擬)，均受限於經費因素，實驗經費幾乎被全數刪除，而陷於經費不足的困境，造成

無法順利如期完成實驗，建議將來若有實驗方面的基礎研究，可否給定充足的經費，若將實驗經費刪除一半以上，則建議將該計畫整個刪除，以避免發生無法完成實驗之窘境。

由於受限於經費，讓我們更加用心就既有設備加以改良，來量測地下水中海水入侵線，本系列研究係利用原使用於量測波高之電容式波高計，經改裝後使用於地下水中水位及海水入侵線量測，效果尚稱良好。

參考文獻

1. Bear, J., Dynamic of Fluids in Porous Media, Elsevier, New York, 1972.
2. Nutting, P.G., Physical analysis of oil sands, Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 14, 1337-1349, 1930.
3. Nuttle, W.K., Comment on "Tidal Dynamics of the Water Table in Beaches" by Peter Nielsen, W.R.R., Vol. 27, NO. 7, 1781-1782, 1991.
4. Strack, O.D.L., Groundwater Mechanics, 732 pp., Prentice Hall Eagle wood Cliffs, New Jersey, 1989.
5. 蔡丁貴，"抽水造成海水上揚之研究(III)"，國家科學委員會補注計畫。NSC 85-2211-E-002-058.