

潮汐波動與降雨對非拘限傾斜含水層的影響

徐筱婷⁽¹⁾ 謝平城^{(2)*}

摘要

本文提出了一種解決非線性 Boussinesq 方程式線性化的方法，係對於一維潮汐及降雨造成非拘限傾斜含水層的地下水流變動進行研究，而與非線性解進行比較時，可得知線性解較能迅速掌握潮汐及降雨地下水位波動的真實情況。本文的基礎是使用 Dupuit-Forchheimer 假設廣泛的淺層地下水流問題，然而同一個沿海含水層中可能會在不同區域有不同的降雨量，故將含水層分為兩個區域，沿海地區設為降雨區，內陸地區則為無降雨區。在此二區域的邊界條件成立時，可得到其交接水位為相等。研究結果顯示在非拘限含水層的底床傾角和地表降雨對地下水位波動的影響是顯著的。

(**關鍵詞**：地下水位、潮汐波動、降雨、傾斜含水層)

Groundwater Response to Tidal Fluctuation and Rainfall in an Unconfined Sloping Aquifer

Hsiao-Ting Hsu⁽¹⁾ *Ping-Cheng Hsieh*^{(2)*}

Graduate Student⁽¹⁾, Professor⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

ABSTRACT

This paper presents an algorithm which linearizes the non-linear Boussinesq equation characterizing the unsteady flow for one-dimensional tidal and rainy groundwater flow in a coastal unconfined sloping aquifer. In comparison with non-linear analytical forms, the present solution can improve the rate of solving those tidal and rainy groundwater fluctuations. The solution is based on the Dupuit-Forchheimer assumptions that problems of wide range in shallow unconfined groundwater flow. Two zones of different rainfall may well comprise a coastal aquifer, with the coastal zone of rainfall and the inland zone of non-rainfall, the analytical boundary condition of coastal and inland water table at both interfaces are equaled. The research result showed that the effect of the bottom

(1)國立中興大學水土保持學系碩士生

(2)國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail: pchsieh@dragon.nchu.edu.tw)

angle and surface rainfall on the groundwater fluctuation is significant in an unconfined aquifer.

(Keywords: groundwater level, tidal fluctuation, rainfall, sloping aquifer)

一、前言

台灣地區總面積約為 3.6 萬平方公里，一千公尺以上的山區佔台灣面積 32%，約略本島的三分之一，由於台灣山高陡峭，造就河川短而流速快，雖然台灣年平均降雨量超過兩千五百公厘，但降雨降至地面河川後，接著很快就流入海洋，所以開發新的水源，對於台灣來說，相對來說比較重要。

依據美國 1995 年的統計資料顯示，有超過 19 州的民生用水以地下水為主。地下水是台灣地區替代降雨普遍率最高的替代水源，廣泛用於農業灌溉、養殖漁業、民生用水，台灣地下水使用以農業灌溉使用較為普遍，約佔 45%。而台灣目前以地下水為主要水源的縣市為彰化、宜蘭、雲林和屏東，普遍分佈於中南部，主要原因為中南部地區降雨較集中於夏季，導致冬季普遍降雨水源不足以供應用水，而地下水則扮演台灣調節水源的重要角色。

在一個自然的情況下，長期超抽地下水會導致地層下陷與海水倒灌的災害，影響農業用地，更嚴重將會使得土壤鹽化，導致日後土壤再也無法種植使用。含水層的補給則須要透過河床，而在特定的地質水文條件下的非拘限含水層，非線性 Boussinesq 方程式採用 Dupuit-Forchheimer (D-F) 假定(Dupuit, 1863)，當在傾角較緩的底床上，假設地下水位非常淺時，自由水面的流線為水平，水力梯度會與斜坡上的自由水面相等。

一般而言，研究方法共分為實驗、數值、解析解三種方法。目前地下水學術研究，主要以數值與解析解較為廣泛，原因為地面下的真實情況較難觀測和預測，實際情況的變動較為未知，進行地下水位觀測所需要的儀器較為昂貴，所以目前現地的觀測以官方進行研究為主。Carr(1971) 曾使用調和分析(Harmonic Analysis)研究愛德華王子島(Prince Edward Island)含水層附近海域的潮汐波動，以 16 天的水井水位紀錄進行分析。

參數對於數值模擬扮演極重要的角色，它可以影響到模擬結果與現地情況是否相符，而更進一步利用不同參數進行不同現地的模擬。Carotenuto et al.(1980)建立沿海區域的含水層模式與參數，Ataie-Ashtiani et al.(2001)則提出了變飽和度數值模型(variably saturated numerical model)，該研究中的參數因子包含了的陡坡、滲水面和不飽和區域，而這些因子會影響含水層的水位變動，模擬的結果中指出，潮汐影響會造成出海的地區污染物的不規則變動。然而隨著模式建立的開始，以及參數的推估後，與現地模擬驗證則格外重要，其中 Pandit et al.(1991)使用有限元素法去計算垂直、水平分量的水力傳導係數，並透過此法估計佛羅里達州聖露西港的含水層潮汐對於地下水位的影響。Robinson & Gallagher(1999)提出二維有限域的地下水模型，研究地下水流向沿海的生態系統，模擬地下水含水層排放流量至海邊的過程，並與東海岸弗吉尼亞州的哥倫比亞含水層進行現地驗證。除了潮汐會造成地下水位的影響

外，於沿海地區的非飽和帶中，空氣壓力波動也會影響地下水位變動。Guo & Jiao(2008)透過數值模擬研究在沿海地區空氣和水的交界面，在封閉的系統而言，當空氣波動會向內陸地區逐漸衰減時，上半部含水層的滲透率會增加。

透過解析解方程式的推導，可提供數值解進行後續的模式建立，然而地表水的滲漏與集結為內陸地區影響地下水位的主要原因，Zissis et al.(2000)和 Bansal & Das(2010)提出河川的流量與水位抬升會造成地下水位的影響，其中 Zissis et al.(2000)利用線性化方法解決非線性 Boussinesq 方程式，研究中指出在相同的條件之下，當降雨量 $R=0$ 時，線性解與非線性解求得的數據幾乎為相等的狀況，然而當傾角越緩及降雨量越大的情況之下，線性解與非線性解的數據差異也就越大，不過還在合理的差異之下；Polubarinova-Kochina(1962)則提出線性均質 Boussinesq 方程式，針對半無限域非拘限傾斜含水層對地面滲漏的影響；Asadi-Aghbolaghi et al.(2011)則針對滲漏含水層(leaky aquifer)的傾角，對地下水波動與時間變動的影響進行討論。Li et al.(2001)提出非拘限含水層的線性 Boussinesq 方程式對於地下水位面含水層(phreatic aquifer)的影響。海水的波動和潮汐也會影響地下水位的變化，Sun(1997)提出的二維水深平均擺動在邊界條件的半無限含水層的地下水流方程式的解析解，並與數值解進行驗證波動的分析。Parlange et al.(1984)、Nielsen et al.(1997)、Teo(2003)、Song et al.(2007)提出潮汐對於地下水位的影響。本文中，針對不同傾角和降雨的情況下，分析潮汐對非拘限含水層的地下水位變化。

二、數學模式

本研究深入探討延 x 軸方向的非拘限傾斜含水層之地下水位變動，其中將斜坡上分為降雨區(I)和非降雨區(II)兩區，藉由潮汐振盪及 I 區降雨量的影響，討論水位的變動情形。其示意圖如圖 1 所示最底層為不透水面， $h_z(L)$ 為平均水位高， $h(L)$ 為實際水深， $R(L/T)$ 為降雨量或補注量， θ 為傾角， L 表示為降雨區域的範圍。

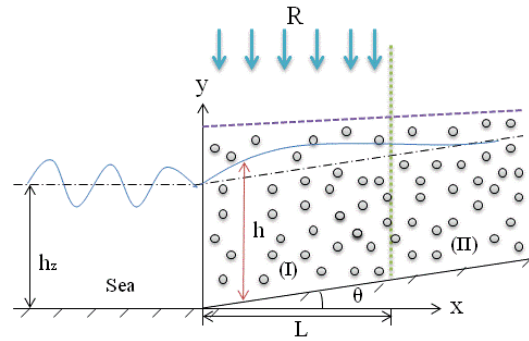


圖 1 受潮汐及降雨影響之示意圖

Figure 1 Schematic diagram of tidal and rainy water table fluctuations in a coastal aquifer.

1、控制方程式

由於降雨和潮汐影響會使得地下水位的抬升，引用 Chapman(1980)改寫的一維 Boussinesq's 方程式為控制方程式，假設含水層為非拘限、均質、等向性和不可壓縮性，一般地下水均採用 Dupuit-Forchheimer 假設條件，流線會平行於底床高程($\frac{\partial h}{\partial x} \ll 1$)和水力梯度會等於自由水面坡度。結果方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \tan \theta \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{S}{K \cos^2 \theta} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R}{K \cos^2 \theta} \quad (1)$$

式中，S 為蓄水係數，K 為水力傳導係數 (L/T)，R 為降雨強度(L/T)，θ 為傾角。L 為長度因次，T 為時間因次。

引用 Brutsaert(1994)和 Zissis et al.(2000) 的線性化方法，將非線性的 Boussinesq 方程式予以線性化。ε 為校準參數，範圍值為 0 < ε ≤ 1，h_z 則為平均水深 L。(1)式可表示為：

$$\epsilon h_z \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \tan\theta \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{S}{K \cos^2\theta} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R}{K \cos^2\theta} \quad (2)$$

當水平底床(θ=0°)時，可將(2)式簡化成(3)式：

$$\epsilon h_z \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{K} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R}{K} \quad (3)$$

潮汐影響地下水位變動的邊界條件為(4)至(6)式，其中h_z為平均水位高，ω 為潮汐波動頻率 (tidal frequency)，a 為潮汐振幅 (amplitude of the tidal fluctuation)：

$$h(x = 0, t) = h_z + a \cdot \cos(\omega t), 0 < t \quad (4)$$

$$h_1(x = L, t) = h_2(x = L, t), 0 < t \quad (5)$$

$$h(x \rightarrow \infty, t) = h_z, 0 < t \quad (6)$$

2、無因次化後控制方程式

為了將控制方程式無因次化，令 $X = \frac{x}{L}$ ， $H = \frac{h}{h_z}$ ， $T = \omega t$ ， $A = \frac{a}{h_z}$ ， $L = \sqrt{\frac{2Kh_z}{S}}$ ，L 為圖 1 上之定義長度，(2)式可整理為：

$$\frac{\partial^2 H}{\partial X^2} - \tan\theta \frac{L}{\epsilon h_z} \frac{\partial H}{\partial X} = \frac{S\omega L^2}{\epsilon h_z K \cos^2\theta} \frac{\partial H}{\partial T} - \frac{RL^2}{K \epsilon h_z^2 \cos^2\theta} \quad (7)$$

再令 $\alpha = \tan\theta \frac{L}{\epsilon h_z}$ ， $\tau = \frac{S\omega L^2}{\epsilon h_z K \cos^2\theta}$ ， $R' = \frac{RL^2}{K \epsilon h_z^2 \cos^2\theta}$ ，(7)式則可簡化為：

$$\frac{\partial^2 H}{\partial X^2} - \alpha \frac{\partial H}{\partial X} = \tau \frac{\partial H}{\partial T} - R' \quad (8)$$

依照圖 1 之示意圖，可將(8)式的控制方程式表示為：

$$\frac{\partial^2 H_1}{\partial X^2} - \alpha \frac{\partial H_1}{\partial X} = \tau \frac{\partial H_1}{\partial T} - R', 0 < X \leq 1, 0 < T \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 H_2}{\partial X^2} - \alpha \frac{\partial H_2}{\partial X} = \tau \frac{\partial H_2}{\partial T}, 1 \leq X, 0 < T \quad (10)$$

水平底床(θ=0°)的控制方程式為：

$$\frac{\partial^2 H_1}{\partial X^2} = \frac{2}{\epsilon} \frac{\partial H_1}{\partial T} - \frac{RL^2}{K \epsilon h_z^2}, 0 < X \leq 1, 0 < T \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 H_2}{\partial X^2} = \frac{2}{\epsilon} \frac{\partial H_2}{\partial T}, 1 \leq X \quad (12)$$

無因次化後的潮汐影響地下水位變動邊界條件為：

$$H(X = 0, T) = 1 + A \cos T, 0 < T \quad (13)$$

$$H_1(1, T) = H_2(1, T), 0 < T \quad (14)$$

$$H(X \rightarrow \infty, T) = 1, 0 < T \quad (15)$$

3、解析解

利用控制方程式中的非齊次項與時間無關的特性，將(9)-(10)式分成暫態解(transient state solution)與穩態解(steady state solution)兩部分再進行求解，(9)-(10)之解為：

$$H_1 = 1 + Ae^{-p \cdot X} \cos(qX + T) + \frac{R'}{\alpha(e^\alpha - 1)} - \frac{R' e^{\alpha \cdot X}}{\alpha(e^\alpha - 1)} + \frac{R' \cdot X}{\alpha}, 0 < X \leq 1, 0 < T \quad (16)$$

$$H_2 = 1 + Ae^{-p \cdot X} \cos(qX + T), 1 \leq X, 0 < T \quad (17)$$

三、結果與討論

本文藉由非齊次項與邊界條件均和時間無關的特性求得閉合型式解(close form solution)，並引用 Parlange et al.(1984)的解析解進行比較，其中由圖 2 中的 ε 參數率定中可得知，當 $\varepsilon=1$ 時會與 Parlange et al.(1984)的線性解較為相符，主要原因為 Parlange et al.(1984)的線性解將 ε 忽略，直接設為 1，傾角 $\theta=0^\circ$ ，平均水深 $h_z=2\text{m}$ ，潮汐振幅 $a=0.65\text{m}$ ，蓄水係數 $S=0.005$ ，水力傳導係數 $K=0.1\text{cm/s}$ ，潮汐波動頻率 $\omega=4\pi\text{rad/day}$ ，由圖 2 可知與 Parlange et al.(1984) 解析解幾乎相同，此解析解成立。

圖 3 與圖 4 為無降雨的情況下潮汐對水位變動的影響，從圖中可以發現，當傾角越大(正向)時，潮汐對水位變動也會越激烈，角度越小時則會越平緩，原因為傾角越大會造成水力梯度隨著 X 方向逐漸升高，促進水在含水層的移動，使得水位的變動較為顯著，而傾角為負值時亦也如此。圖 5 與圖 6 則是表示在降雨的情況下潮汐對水位變動的影響，研究以 $\theta=0^\circ$ 為基準與 $X \leq 1$ 為降雨區進行探討，首先當 $\theta > 0^\circ$ 時，會發現當傾角越大延遲效應越顯著，角度越趨近於零則相反，當 $\theta < 0^\circ$ 時也是以上述規律而變動，但值得注意的是，圖 5 角度越大最高水位則越小，而圖 6 為角度越小(負值越大)最高水位也越小，主要原因有兩項：(1)傾角大於零時，當傾角越大越容易受到潮汐變動的影響，造成地下水位較低。(2)傾角越小時，往 X 軸方向的底床也就越低，潮汐會造成地下水位快速變低(見圖 3)，使得潮汐及降雨影響下的最高地下水水位為 $\theta=0^\circ$ 。由圖 3 至圖 6 中可分別比較潮

$$\text{其中， } P = -\frac{a}{2} + \frac{\sqrt{2a^2 + 2\sqrt{a^4 + 16\tau^2}}}{4},$$

$$q = -\frac{2\tau}{\sqrt{2a^2 + 2\sqrt{a^4 + 16\tau^2}}}.$$

水平底床($\theta=0^\circ$)，(11)-(12)可解為：

$$H_1 = 1 + Ae^{-\frac{X}{\sqrt{\varepsilon}}} \cos\left(-\frac{X}{\sqrt{\varepsilon}} + T\right) - \frac{R \cdot X^2}{\varepsilon h_z S \omega} + \frac{R \cdot X}{\varepsilon h_z S \omega}, \quad 0 < X \leq 1, \quad 0 < T \quad (18)$$

$$H_2 = 1 + Ae^{-\frac{X}{\sqrt{\varepsilon}}} \cos\left(-\frac{X}{\sqrt{\varepsilon}} + T\right), \quad 1 \leq X, \quad 0 < T \quad (19)$$

4、線性雨型解析解

在沿海地區，很容易受到季風的影響，引起降雨的發生。而在本研究中，特別針對同一時間不同地區的降雨量進行分析與討論，探討地下水位的變化。首先令 $R=bX+c$ ，並將 R 代入(9)與(11)控制方程式，邊界條件為(13)-(15)，再令 $R'' = \frac{L^2}{Kch_z^2 \cos^2 \theta}$ ，即可求得其解為：

$$H_1 = 1 + Ae^{-P \cdot X} \cos(qX + T) - \frac{(2+a)bR'' + 2cR''}{2\alpha^2(1-e^\alpha)} + \frac{(2+a)bR'' + 2cR''}{2\alpha^2(1-e^\alpha)} e^{-\alpha \cdot X} + \frac{bR'' X^2}{2\alpha} + \frac{bR'' X}{\alpha^2} + \frac{cR'' X}{\alpha}, \quad 0 < X, \quad 0 < T \quad (20)$$

水平底床($\theta=0^\circ$)之解為：

$$H_1 = 1 + Ae^{-\frac{X}{\sqrt{\varepsilon}}} \cos\left(-\frac{X}{\sqrt{\varepsilon}} + T\right) - \frac{bL^2 X^3}{6K \varepsilon h_z^2} - \frac{cL^2 X^2}{2K \varepsilon h_z^2} + \frac{bL^2 X}{6K \varepsilon h_z^2} + \frac{cL^2 X}{2K \varepsilon h_z^2}, \quad 0 < X \leq 1, \quad 0 < T \quad (21)$$

汐與降雨對地下水位的影響，潮汐影響主要是振幅的變動，降雨則會影響水位的抬升，當然本文是以時間為零的情況下進行分析，不同的時間會造成不同的潮汐影響水位變化，也會影響加上降雨後的水位變化。

圖 7 與圖 8 為線性降雨分佈時不同之水位變化，設定降雨量 R 最大為 15mm/h 的情況下，由圖中可以發現均勻降雨時變化較為顯著，反之 $R=15X$ 時則相反，而比較圖 7 ($\theta=0^\circ$) 和圖 8 ($\theta=3^\circ$) 中可以發現，當傾角越大，水位變化會發生延遲，較慢達到最高水

位，原因為受到不透水面隨傾角的抬升。圖 9 與圖 10 則設定總降雨量為 15mm/h 於 $X \leq 1$ 的區域內，從圖中可發現均勻降雨的 $R=15\text{mm/h}$ 會最先提高水位和下降水位，反之隨著距離增加的降雨量 $R=30X$ 則最慢提高水位和下降水位，由圖 9 可發現約略在 $X=0.5$ 時會發生水位高低順序與原先顛倒，主因為從 $X=0.5$ 開始以後，隨距離增加的線性降雨量 $R=30X$ 為最大降雨量，而 $X=0.5$ 時每個狀況下皆為降雨量 $R=15\text{mm/h}$ 。

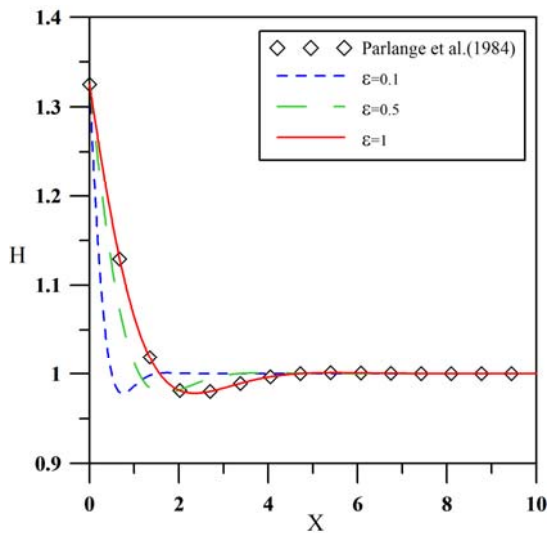


圖 2 水位受不同 ε 參數影響之變化
Figure 2 Tide-induced water table fluctuations versus horizontal distance with various additional parameters by calibration.

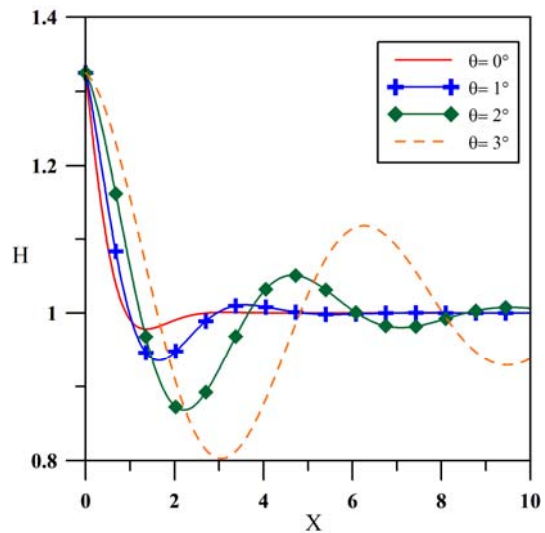


圖 3 不同傾角($0^\circ \sim 3^\circ$)時受潮汐影響之水位變化 ($T=0$)
Figure 3. Tide and rainfall water table fluctuations versus horizontal distance with various angles ($0^\circ \sim 3^\circ$, $T=0$).

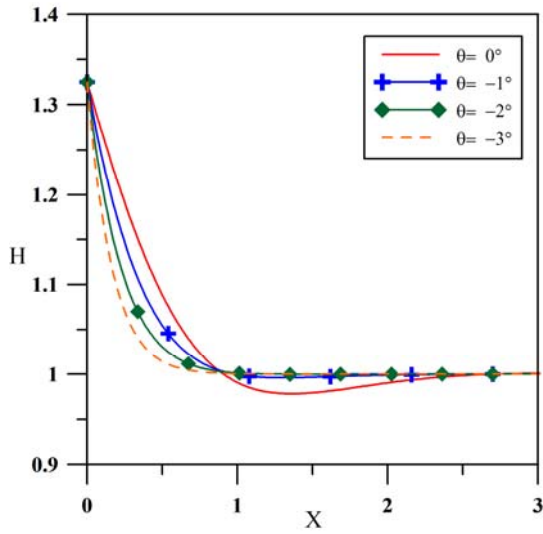


圖 4 不同傾角($0^{\circ}\sim -3^{\circ}$)時受潮汐影響之水位變化

Figure 4 Tide and rainfall water table fluctuations versus horizontal distance with various angles($0^{\circ}\sim -3^{\circ}$, $T=0$).

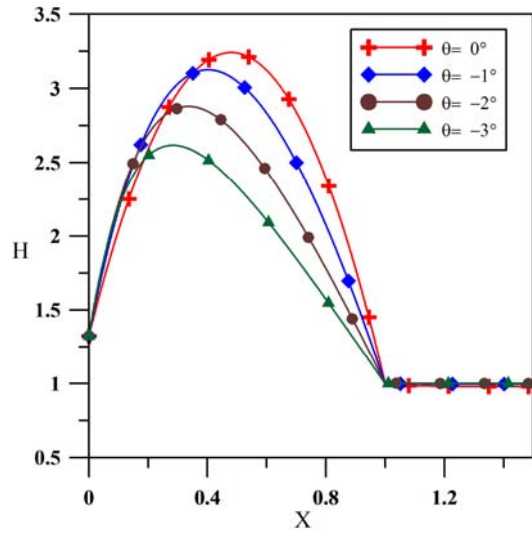


圖 6 不同傾角($0^{\circ}\sim -3^{\circ}$)時受潮汐及降雨影響之水位變化

Figure 6 Tide and rainfall water table fluctuations versus horizontal distance with various angles($0^{\circ}\sim -3^{\circ}$, $T=0$).

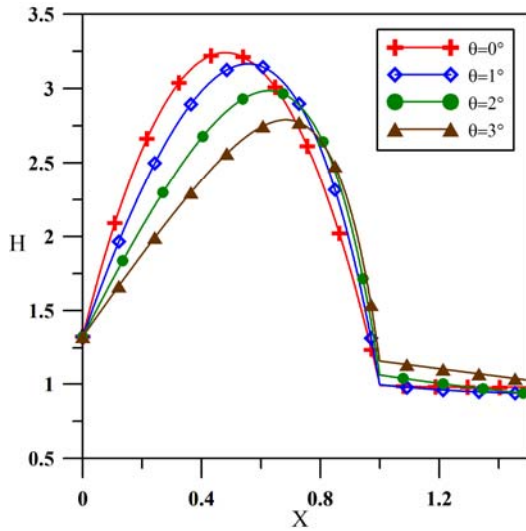


圖 5 不同傾角($0^{\circ}\sim 3^{\circ}$)時受潮汐及降雨影響之水位變化

Figure 5 Tide and rainfall water table fluctuations versus horizontal distance with various angles($0^{\circ}\sim 3^{\circ}$, $T=0$).

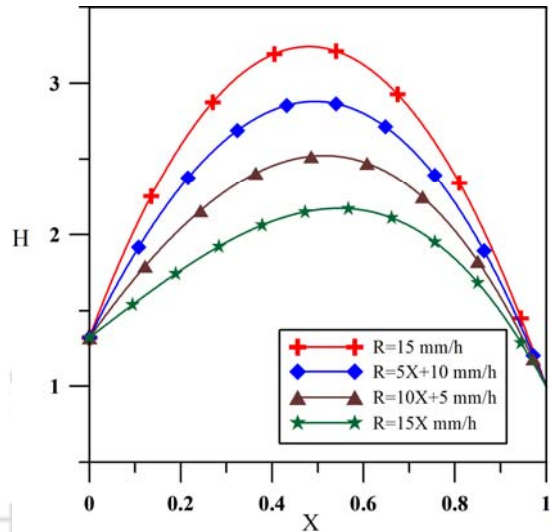


圖 7 線性降雨分佈時不同之水位變化($\theta=0^{\circ}$)
Figure 7 Linear rainfall water table fluctuations versus horizontal distance with various cases. ($\theta=0^{\circ}$)

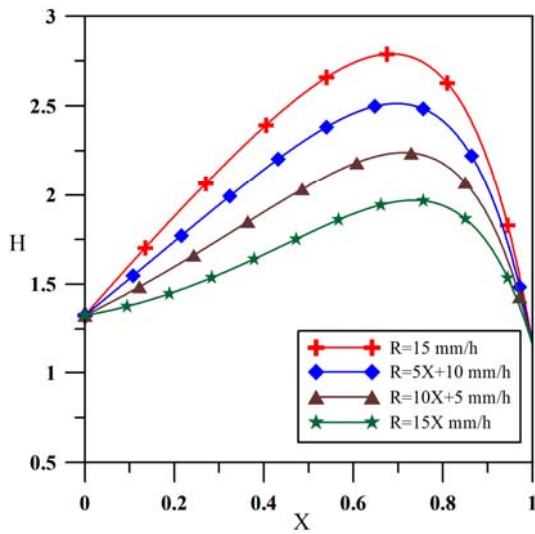


圖 8 線性降雨分佈時不同之水位變化($\theta=3^\circ$)
Figure 8 Linear rainfall water table fluctuations versus horizontal distance with various cases.($\theta=3^\circ$)

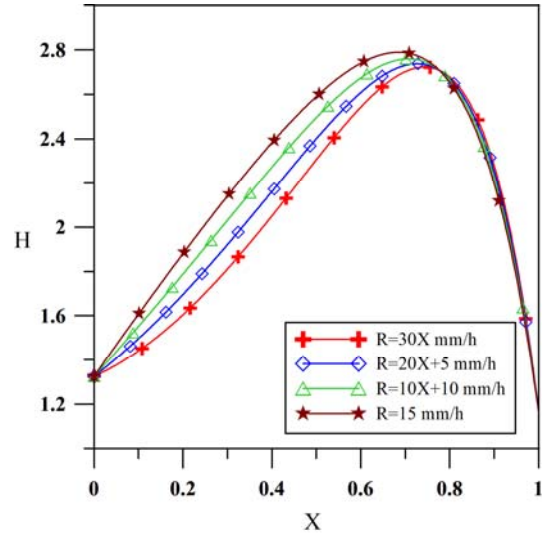


圖 10 固定總降雨量時不同之水位變化($\theta=3^\circ$)
Figure 10 Fixed rainfall in total water table fluctuations versus horizontal distance with various cases.($\theta=3^\circ$)

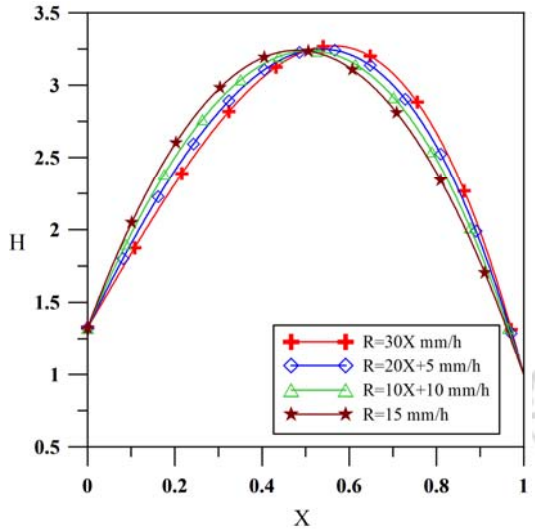


圖 9 固定總降雨量時不同之水位變化($\theta=0^\circ$)
Figure 9 Fixed rainfall in total water table fluctuations versus horizontal distance with various cases.($\theta=0^\circ$)

四、結論與建議

本文使用 Chapman(1980) 推導出的 Boussinesq's 方程式，應用於傾斜底床的地下水位，首先將非線性 Boussinesq's 方程式引用 Brutsaert(1994)的方法進行線性化，當然線性解相對於非線性解的準確度不是最佳，但在合理的範圍內能增快運算的時間，將對於後續的分析有莫大的幫助。文中，並對於潮汐邊界條件的設立、降雨量分佈的變化、傾角的改變進行討論，以下為結論：

1. 以時間為零的情況下進行分析，降雨會造成地下水位的抬升，潮汐會隨著振幅的變動而影響水位，當不同的潮汐加降雨影響會造成不一樣的水位變化。
2. 傾角的大小會影響底床的變動，受到不透水面的底床隨傾角抬升，在降雨時期會隨

著傾角越大，地下水位較趨緩達到最高水位，然而單就潮汐對地下水位的影響，當傾角越大水位變動也會越激烈。

3. 降雨量的多寡會影響當地的環境，隨著不同的降雨分佈進行討論，可得知當降雨量越大地下水位也會升高，穩定的降雨有益於地下水資源的使用。
4. 本研究是以解析解進行假設條件之模擬為主，與真實情況還是有所差距，建議後人研究可以增加現地真實情況進行驗證與分析。

五、參考文獻

1. Li, L., Barry, D.A., Jeng, D.S. (2001), "Tidal fluctuations in a leaky confined aquifer: dynamic effects of an overlying phreatic aquifer," *Water Resources Research* 37 (4), 1095–1098.
2. Carotenuto, L., Di Pillo, G., Raiconi, G., Troisi, S. (1980), "Mathematical modeling and parameter identification for a coastal aquifer," *Advances in Water Resources* 3, 151–157.
3. Guo, H.P. and Jiao, J.J. (2008), "Numerical study of airflow in the unsaturated zone induced by sea tides," *Water Resources Research* 44, W06402.
4. Pandit, A., Ei-Khazen, C.C., Sivaramapillai, S.P. (1991), "Estimation of hydraulic conductivity values in a coastal aquifer," *Ground Water* 29 (2), 175–180.
5. Robinson, M.A. and Gallagher, D.L. (1999), "A model of ground water discharge from an unconfined coastal aquifer," *Ground Water* 37 (1), 80–87.
6. Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., Lockington, D.A. (2001), "Tidal effects on groundwater dynamics in unconfined aquifers," *Hydrological Processes* 15, 655–669.
7. Carr, P.A. (1971), "Use of harmonic analysis to study tidal fluctuation in aquifers near the sea," *Water Resources Research* 7 (3), 632–643.
8. Nielsen, P., Fenton, J.D., Aseervatham, R.A., Perrochet, P. (1997), "Watertable waves in aquifers of intermediate depths," *Advances in Water Resources* 20, 37–43.
9. Sun, H. (1997), "A two-dimensional analytical solution of groundwater response to tidal loading in an estuary," *Water Resources Research* 33 (6), 1429–1435.
10. Zissis, T.S., Teloglou, I.S., Terzidis, G.A. (2000), "Response of a sloping aquifer to constant replenishment and to stream varying water level," *Journal of Hydrology* 243, 180–191.
11. Brutsaert, W. (1994), "The unit response of groundwater outflow from a hillslope," *Water Resources Research* 30(10), 2759–2763.
12. Chapman, T.G. (1980), "Modeling groundwater flow over sloping beds," *Water Resources Research* 16(6), 1114–1118.
13. Bansal, R.K. and Das, S.K. (2011), "Response of an unconfined sloping

- quifer to constant recharge and seepage from the stream of varying water level,” *Water Resour Manage* 25, 893–911.
14. Song, Z., Li, L., Kong, J., Zhang, H. (2007), “A new analytical solution of tidal water table fluctuations in a coastal unconfined aquifer,” *Journal of Hydrology* 340, 256-260.
15. Asadi-Aghbolaghi, M., Chuang, M.H., Yeh, H.D. (2012), “Groundwater response to tidal fluctuation in a sloping leaky aquifer system,” *Applied Mathematical Modelling* 36, 4750–4759.
16. Teo, H.T. (2003), “Tidal dynamics in coastal aquifers,” in fulfillment of the requirements for the award of the degree of Master of Philosophy, Griffith University.

102 年 01 月 11 日收稿

102 年 01 月 14 日修改

102 年 01 月 28 日接受

國立中興大學 

National Chung Hsing University