

## 探討非飽和土壤參數對補注井之地下水補注成效之影響

蔡佩勳<sup>1</sup> 郭倍翔<sup>2</sup> 邱勢棠<sup>3</sup> 何佳欣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>朝陽科技大學營建工程系副教授

<sup>2</sup>朝陽科技大學營建工程系碩士

<sup>3</sup>朝陽科技大學營建工程系碩士班研究生

### 摘要

由於台灣降雨型態分布不均及地形陡峭等因素，許多降雨無法被有效的利用即流入大海中，且台灣部分區域降雨量貧乏，使養殖業、農業用水需求量增加，超抽地下水，導致地下水位降低、海水入侵及地層下陷等問題，如何有效的執行地下水補注成為一個重要的議題。地下水補注為非飽和土壤滲流的問題，故本研究使用有限元素軟體ABAQUS來模擬人工補注井對一區域之蓄水層進行地下水補注之分析，將討論van Genuchten model 土壤參數  $\alpha$  與  $n$  對地表高程變化及補注量之影響。由分析結果顯示，當  $\alpha$  值或  $n$  值愈小時，補注量愈多，地表隆起量愈大，但蓄水層完成地下水補注所需之時間愈長。對於地表隆起量而言，當參數  $n$  減少 40% 時所產生之隆起量比參數  $\alpha$  減少 40% 時來的明顯。

**關鍵字：**非飽和土壤、地下水補注、補注井、數值分析。

## Effects of Unsaturated Soil Parameters on the Effectiveness of Well Recharge

Pei-Hsun Tsai<sup>1</sup>, Bei-Xiang Guo<sup>2</sup>, Shih-Tang Chiu<sup>3</sup>, Jia-Shin He<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology, ROC

<sup>2</sup>Master, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology, ROC

<sup>3</sup>Master Student, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology, ROC

### Abstract

The distribution of rainfall is not uniform in Taiwan due to geographical and climatic condition. It happens that a lot of underused rainwater flows into the sea. When the consumption of water for aquaculture and agriculture increases, groundwater can be ultra-pumping. It will be the reason for reducing groundwater level, invading seawater, and soil settlement. Therefore, how to perform groundwater recharge effectively is an important issue. It is a coupled mechanical-seepage flow analysis in unsaturated soil for groundwater recharge. ABAQUS software was used to simulate a recharge well in a layer of aquifer. Parametric studies of recharge effectiveness were evaluated in this study. The influencing parameters are the values of unsaturated soil parameter  $\alpha$  and  $n$  of van Genuchten model. The effects of these parameters on the amount of recharge and ground surface uplift were studied. The result shows that the amount of recharge and ground surface uplift are larger, the duration of recharge is longer when the values of  $\alpha$  or  $n$  are small. The effect of the value of  $n$  on ground surface uplift is more than that of the value of  $\alpha$ .

**Key Words:** Unsaturated soil, Groundwater recharge, Recharge well, Numerical analysis.

### 1 前言

地下水的補注辦法有許多種，除了天然的降雨、河流、湖泊外，也可藉由人工補注井、人工湖來進行地下水補注。雖然人工湖是相當有效的補注方式，但

受地形、區域的限制，在人口密度高及土地昂貴之地區不符合經濟效益，而人工補注井較不受區域限制，所占面積也小許多，且於地面與蓄水層之間有不透水層存在時，即可藉由人工補注井的設置，於豐水季儲蓄地下水資源，以提供枯水期水資源的使用，並且改

善地層下陷問題。

根據Fredlund and Rahardjo (1993)，非飽和土壤通常被分為三相系，其組成包括固相(土壤顆粒)、液相(孔隙水)、氣相(空氣)，而液相與氣相之間尚有另一相存在，為水與空氣之分界面，分界面兩側產生一壓力差，其中孔隙氣壓力為正，孔隙水壓力為負，兩者間的壓力差稱為基質吸力。而分界面稱為收縮膜，將其視為非飽和土壤之第四相，當空氣相連續時，收縮膜與土壤顆粒發生相互作用，對土壤的力學行為產生影響。van Genuchten (1980)提出非飽和土壤基質吸力(毛細壓力)與飽和度之關係式，式中包含兩個擬和參數，分別為 $\alpha$ 及 $n$ ，其中 $\alpha$ 與進氣吸力值(air entry value)有關， $n$ 與土壤之孔隙大小相關。Harrison and Blight (2000)指出水分特徵曲線為非飽和土壤之基質吸力與飽和度的關係曲線，受土壤顆粒成分、土壤結構與孔隙大小、型態等因素之影響，土壤對水分的保水能力會隨著基質吸力之大小而改變。劉建榮(2001)研究指出水分特徵曲線參數 $\alpha$ 與 $n$ 對評估現地實驗之暫態補注量有極大的影響，且參數 $\alpha$ 改變時對入滲量之影響較 $n$ 大。范嘉程與黃俊龍(2012)利用壓力鍋試驗得到不同深度下，非飽和頁岩風化土壤的水分特徵曲線。由其研究結果顯示，頁岩風化的程度將影響土壤保水能力和土壤水分特徵曲線。由粒徑分布曲線與水分特徵曲線之參數( $\alpha$ 、 $n$ )的關聯性得知， $\alpha$ 值與初始孔隙比 $e$ 呈反比關係， $n$ 值與粒徑分布曲線之斜率呈正比關係。

倪春發等人(1999)以2D-FEMFAT來模擬砂土、粉土、黏土三種均勻土壤之定水頭補注模擬，結果顯示在現地補注之影響區域以及補注量的多寡，主要決定於土層飽和的滲透係數。翁琮哲(2001)採用MODFLOW地下水水流模式及MT3DMS汙染物傳輸模式，針對受汙染之含水層進行補注及回抽模擬。結果顯示，於受汙染之含水層使用ASR (aquifer storage recovery)井補注法是相當有效的。相對於人工湖，較不受地形限制，所需場址也較小。ASR井補注法除了可在豐水期將補注水暫時儲存於蓄水層內，直至枯水期再抽出使用外，亦可有效地將補注區之汙染物逐年排出。莊志威(2010)使用GMS介面之FEMWATER模式，進行東莒島大坪地區之地下水水理現象模擬，由模擬結果顯示，截水牆的設置可使截水牆上游水位上升約1公尺。劉致翔(2011)探討地下水補注對防止海水入侵拘限含水層的影響，當補注量提高時，能有效阻擋海水往內陸推進。當土壤孔隙率增加，海水入侵的程度並無明顯改變；而水力傳導係數較高的土壤將使海水入侵現象更為加劇。戴宏育(2013)以SUTRA模式對屏東平原海水入侵進行數值模擬，且探討不同整治計畫對改善海水入侵之影響，由其模擬結果顯示，當補注水量充足的情況(1cms)，於內陸地區設置補注井可大幅度地將海水逼退，補注量的多寡對改善海水入侵有決定性的影響。蔡佩勳等人(2014)以有限差分法軟體FLAC 5.0模擬人工湖的湖水入滲至地下水的過程，探討土壤初始飽和度以及三種不同土壤(標準砂、壤土、粉質壤土)對人工湖附近地表高程變化及地下水補注量之影響。其結果顯示，在不同初始飽和度(50%、60%、70%)中，初始飽和度70%時隆起量最大，飽和度50%

最小，但初始飽和度對最終累積的地下水補注量影響並不大。比較砂、壤土與粉質壤土對隆起量與補注量之影響，發現土壤飽和和滲透係數愈高，其最終累積的地下水補注量愈多，但地表最終的隆起量卻愈小，因此如果以地下水補注量為考量時，人工湖應設置於透水性良好之砂土層，但其所回升的地表高程可能就不如細粒料含量較多的土壤。

假設非飽和土壤之孔隙氣壓力為零，則孔隙水壓力為基質吸力之負值。因為非飽和土壤基質吸力的大小受其飽和度之影響，且飽和度也影響著非飽和土壤之滲透係數、滲流速度與地下水完成補注之天數。隨著井水不斷補注地下水，使得非飽和土壤之孔隙水壓逐漸增加，土壤之有效應力降低，使地表產生隆起。不同之基質吸力與飽和度關係將對地下水補注成效與地表隆起量造成影響，本文主要利用滲流與力學耦合分析，探討地下水在補注過程中，不同非飽和土壤的基質吸力與飽和度關係曲線(水分特徵曲線)對補注量與地表隆起量之影響。在非飽和土壤滲流/力學耦合分析中，滲流模式本文是採用van Genuchten (1980)所提出之非飽和土壤基質吸力 $\psi$ 與有效飽和度 $S_e$ 之關係式，而力學模式是採用莫爾庫倫模式，此兩模式皆可利用ABAQUS/Standard來完成。

## 2 數值分析方法

### 2.1 補注井之數值模擬

本研究考慮非飽和土壤之滲流行為，以數值分析軟體模擬補注井對蓄水層進行地下水補注，並在遠處設置阻水牆，形成類似地下水庫的功能，不僅有蓄水作用尚可使地表高程回升。本研究最後將探討土壤之VG model參數 $\alpha$ 與 $n$ 對補注成效之影響。

本研究主要以有限元素軟體ABAQUS/Standard中所提供之滲流/力學耦合分析類型來求解非飽和滲流問題，以軸對稱方式模擬人工補注井對一圓柱區域之蓄水層進行地下水補注，模型尺寸如圖1所示，土層分為黏土層及蓄水層，黏土層半徑200m，厚度5m，蓄水層半徑200m，厚度10m，補注井位置在模型左側，補注井通過黏土層直至蓄水層共15m深。本研究之力學模式採用莫爾庫倫模式，在土壤尚未降伏前，仍屬彈性行為，因此所需輸入的材料參數包括密度、泊松比及楊氏係數。

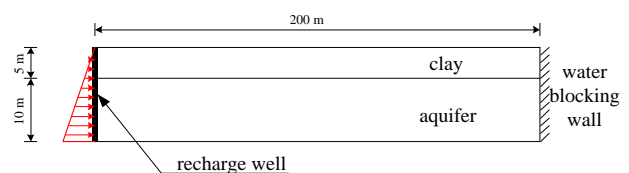


圖 1 補注井尺寸示意圖

非飽和土壤之滲透係數除了是孔隙比的函數，也是飽和度 $S_r$ 的函數，隨著飽和度的下降，滲透係數隨之降低。在ABAQUS內部是以一個折減係數 $k_s$ 來考慮飽和度對滲透係數之影響，在ABAQUS/Standard中，

當飽和度

$$\begin{aligned} S_r < 1.0 \text{ 時, } k_s &= (S_r)^3 \\ S_r = 1.0 \text{ 時, } k_s &= 1.0 \end{aligned} \quad (1)$$

計算時非飽和土壤滲透係數按照飽和度 $S_r$ 的不同，修正為折減係數 $k_s$ 與飽和滲透係數 $k$ 之乘積。

本研究採用 van Genuchten (1980) 所提出之非飽和土壤基質吸力  $\psi$  與有效飽和度  $S_e$  之關係，

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{S_r - S_r^r}{1 - S_r^r} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (3)$$

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (4)$$

其中 $\theta_s$ =飽和體積含水量(%),  $\theta = S_e$ 所對應之體積含水量(%),  $\theta_r$ =殘餘體積含水量(%),  $S_r^r$ 為殘餘飽和度且

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

在執行 ABAQUS 分析前，由不同之 van Genuchten 土壤水分特徵曲線參數  $\alpha$  與  $n$  組合，計算不同飽和度所對應之基質吸力值，以表格方式表示，再將其輸入於 ABAQUS 之滲流參數設定中，軟體將依此由非飽和土壤各節點孔隙水壓得到該處之飽和度 $S_r$ ，再按式(1)計算該處之滲透係數，再依此進行滲流分析，得到下一時步(timestep)之各節點孔隙水壓，重複以上滲流/力學耦合分析，直到完成所有時步的分析。

在討論 van Genuchten 土壤水分特徵曲線參數  $\alpha$  與  $n$  時，則孔隙比( $e$ )、內摩擦角( $\phi$ )、密度( $\rho$ )、楊氏係數( $E$ )及飽和滲透係數( $k$ )皆保持固定不變，蓄水層(砂)之泊松比固定為 0.3，初始飽和度固定為 30%，各土壤材料參數如表 1 所示。

表 1 材料參數設定值

參數	黏土	蓄水層(砂)
密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	1700	1630
楊氏係數(kPa)	1E+4	1.7E+4
泊松比 $\nu$	0.49	0.3
凝聚力 $c(\text{kPa})$	6	0
內摩擦角 $\phi$	24°	37°
孔隙比 $e$	0.6	0.63
飽和滲透係數, $k(\text{m/s})$	4.8E-9	5.7E-4

本研究將補注井之地下水補注過程的數值模擬分成 17 個分析步(Step)，Step-1 主要為初始應力平衡，Step-2 開始進行補注井之地下水補注，模擬井水位漸漸提升，井水上升過程共分成 15 個分析步(即 Step-2~Step-16)，每一分析步之時間設定為 1000 秒，

即以 1mm/sec 之速率上升井水位，因此執行完一個分析步，井水位高度上升 1m，至 Step-16 時井水位與地表同高，分析步 Step-17 模擬井水位維持與地表面同高，並持續補注至整個蓄水層飽和度不再明顯增加為止，這 17 個分析步之時間，總共為 120 天(4 個月豐水期為其補注時間)。

為建立地下水補注前土層的初始應力場，於第一個分析步(Step-1)對整個模型施加往下的重力加速度  $10\text{m/s}^2$ ，然後再進行力平衡分析。土體為孔隙介質，為了定義其初始狀態，給定土層之初始孔隙比和初始孔隙水壓，以 ABAQUS 之預定義場功能來設定，黏土層之初始孔隙比假設為 0.6，蓄水層之初始孔隙比為 0.63，如表 1 所示。在 ABAQUS/Standard 滲流/力學耦合分析中，通過預定義場功能來設定初始孔隙水壓的分布。本研究為控制初始蓄水層之飽和度，將依照不同的水分特徵曲線所對應之基質吸力大小，給定不同的初始孔隙水壓分布，以控制初始飽和度皆為 30%。

## 2.2 水分特徵曲線之參數

本研究引用劉建榮(2001)試驗所得之土壤水分特徵曲線參數， $\theta_r = 0.12$ 、 $\theta_s = 0.43$ 、 $\alpha = 2.2(1/\text{m})$ 、 $n = 2.9$ ，並令其為基本組。本研究為討論參數  $\alpha$  與  $n$  對地下水補注之影響，將 van Genuchten 土壤水分特徵曲線參數  $\alpha$  分為 1.32、1.76、2.64 及 3.08(1/m)，參數  $n$  則分為 1.74、2.32、3.48 及 4.06 來作比較，且如表 2 所示。

表 2 各參數分析結果一覽表

參數值		最終隆起量 (cm)	最終補注量 ( $\text{m}^3$ )
$\alpha$	$n$		
<b>*2.2</b>	<b>2.9</b>	<b>4.7</b>	<b>302926</b>
1.32	2.9	4.91	310418
1.76	2.9	4.81	302740
2.64	2.9	4.60	277181
3.08	2.9	4.59	279542
2.2	1.74	6.83	312372
2.2	2.32	4.93	311450
2.2	3.48	4.62	281293
2.2	4.06	4.59	282626

\*以此情況作為基本組進行比較

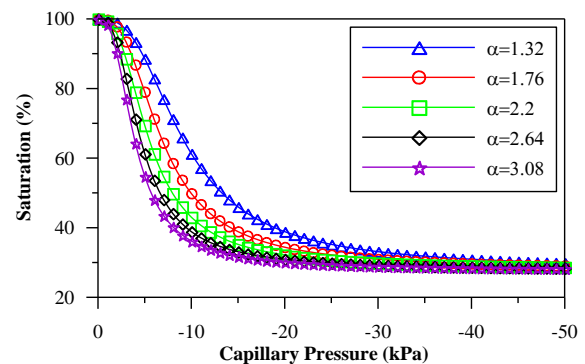


圖 2 不同參數  $\alpha$  之水分特徵曲線圖( $n=2.9$ )



不同  $\alpha$  值與  $n$  值之水分特徵曲線分別如圖 2 與圖 3 所示，由圖可知，當土壤之初始飽和度固定為 30% 時，對應之基質吸力有不同的大小。

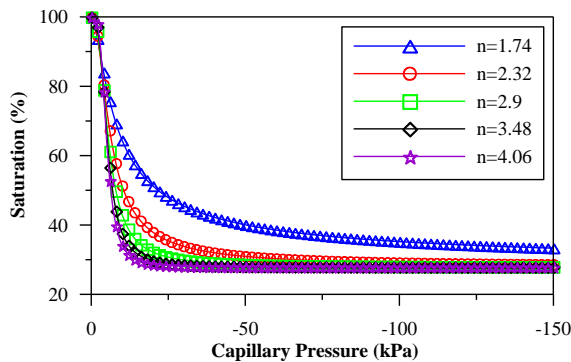


圖 3 不同參數  $n$  之水分特徵曲線圖( $\alpha=2.2$ )

### 2.3 元素種類及有限元素網格

元素的選擇將會影響模擬之結果，ABAQUS/Standard 針對平面應變、軸對稱和三維問題提供兼具孔隙水壓與應力之元素以進行有限元素分析之用，由於本研究為軸對稱之滲流/力學耦合分析，故選用 CAX4P 元素，此元素可輸出應力、應變、流體速度及孔隙水壓力。模型尺寸為半徑 200(m)，厚度 15(m)，元素大小為 1(m)×1(m)，共分割成 3000 個元素。

### 2.4 邊界條件之設定

補注井數值分析模型之邊界條件分為力學條件與滲流條件兩種：

#### a. 力學邊界條件

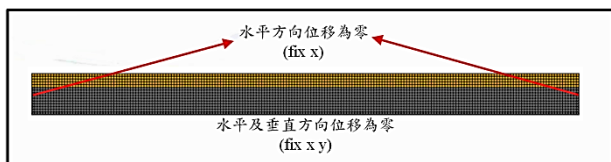
為防止土層加載時不發生整體位移，將模型左右兩側邊界之水平方向位移固定，土層底部邊界之水平及垂直方向位移固定不動，如圖 4(a)所示。

#### b. 滲流邊界條件

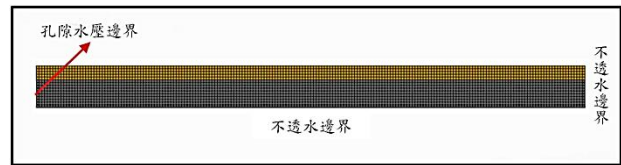
滲流之邊界條件分為孔隙水壓邊界及不透水邊界，如圖 4(b)所示。孔隙水壓邊界主要設定在井壁之位置，於模型左側 16 個節點(如圖 5 紅點處)上施加不同水壓力：

$$u_w = \gamma_w \times (\text{補注水位高度} - \text{節點高度}) \quad (6)$$

其中  $u_w$  為水壓力， $\gamma_w$  為水的單位重。



(a) 力學邊界條件示意圖



(b) 滲流邊界條件示意圖

圖 4 補注井邊界條件示意圖

模型右側為阻水牆，因此模型右側及底部為不透水邊界。於 ABAQUS 中，若不指定邊界條件時，該邊界預設為不透水邊界，即通過該邊界的流量為零。

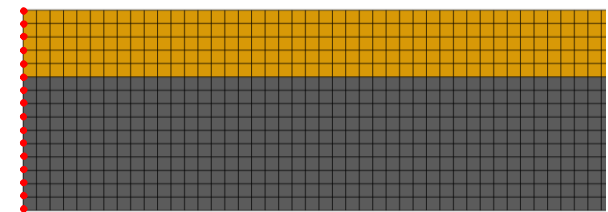


圖 5 補注井補注位置示意圖

## 3 分析結果與討論

分析  $\alpha$  參數或  $n$  參數對補注量與地表隆起量的影響時，補注井深度固定為 15m，討論  $\alpha$  參數與  $n$  參數基本組的  $\pm 20\%$  及  $\pm 40\%$  時，對地表高程變化及補注量之影響，初始飽和度均固定為 30%，每次補注井之地下水補注時間為 120 天，參數影響分析結果如表 2 所示。

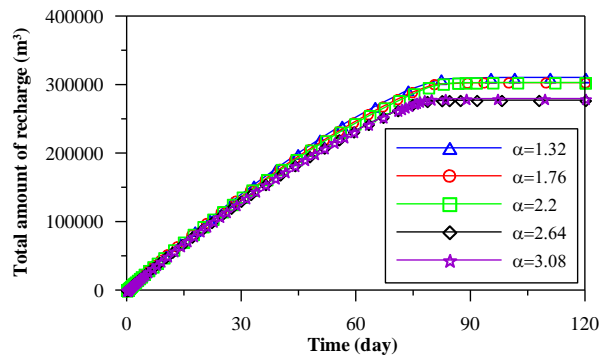
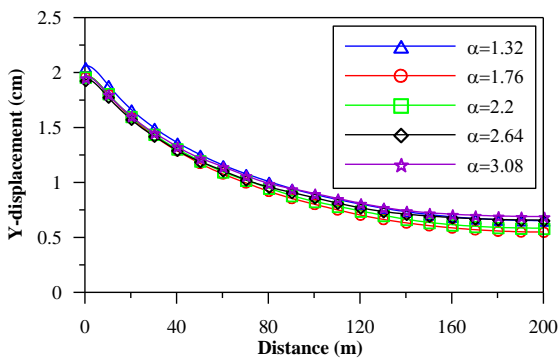
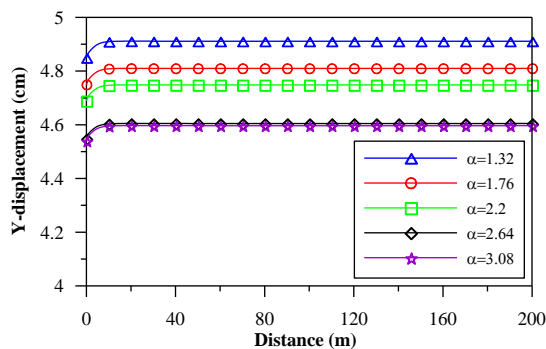


圖 6 不同參數  $\alpha$  之總補注量比較圖( $n=2.9$ )

完成地下水補注之時間是指補注速率隨土壤飽和度之增加而減緩，當補注量不再明顯增加的時間視為完成補注之時間。 $\alpha$  值於 1.32、1.76、2.2、2.64 及 3.08 時的最終總補注量分別為 310,418 $m^3$ 、302,740 $m^3$ 、302,926 $m^3$ 、277,181 $m^3$  及 279,542 $m^3$ ，如圖 6 所示，蓄水層完成地下水補注之時間分別約為 95 天、86 天、86 天、80 天及 80 天，綜合上述得知，當  $\alpha$  值愈小時，補注量有愈多之趨勢，但  $\alpha$  等於 2.64 與 3.08 時補注量差異不大，而當  $\alpha$  值愈小時，對蓄水層完成地下水補注所需之時間較久。



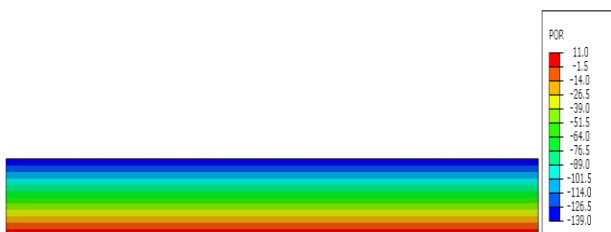
(a) 30 天後



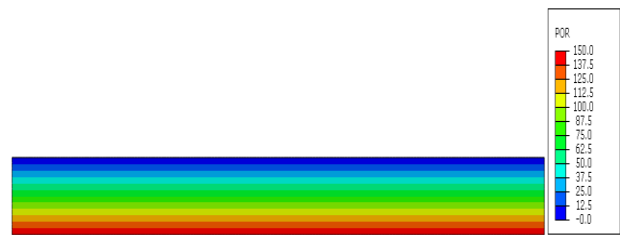
(b) 120 天後

圖 7 不同參數  $\alpha$  之地表垂直位移比較圖

圖 7 為地下水補注至第 30 與 120 天之地表垂直位移量，可看出在地下水補注至第 30 天時， $\alpha$  值的改變並未對隆起量產生明顯差異，補注至第 120 天時可看出，當  $\alpha$  值愈小時地表垂直位移量愈大，其原因可由不同參數  $\alpha$  之水分特徵曲線(圖 2)看出，當  $\alpha$  值愈小其水分特徵曲線較緩，需較大的基質吸力值才能對應至初始飽和度 30%，而  $\alpha$  值愈大其水分特徵曲線較陡峭，較小的基質吸力即可對應至初始飽和度 30%，故在模擬分析時，為了使初始飽和度在 30%， $\alpha$  值等於 3.08 時，初始孔隙水壓設定為負 20.5kPa 即可對應到初始飽和度 30%，從初始應力平衡階段(圖 8(a))補注至 120 天後(圖 8(b))，以土層中間深度的點位(深度=7.5m)為例，孔隙水壓由負 64kPa(經初始應力平衡後)增加為正 75kPa(補注至第 120 天)，孔隙水壓增加 139kPa。



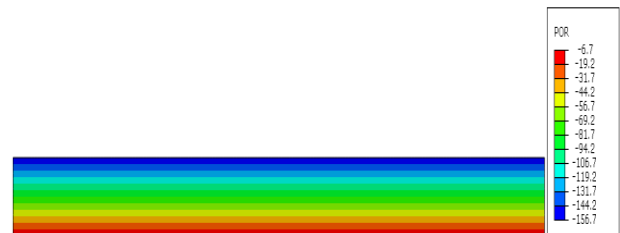
(a) 初始狀態



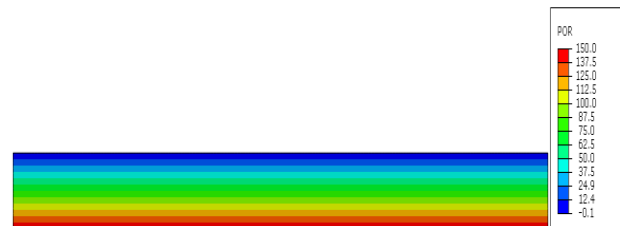
(b) 120 天後

圖 8 參數  $\alpha=3.08$  之孔隙水壓分布圖

而  $\alpha$  等於 1.32 時，對應初始飽和度 30% 之孔隙水壓為負 50kPa，故初始孔隙水壓設定為負 50kPa，從初始應力平衡階段(圖 9(a))補注至 120 天後(圖 9(b))，孔隙水壓由負 81.7kPa(經初始應力平衡後)增加為正 75kPa，增加約 157kPa 的孔隙水壓，孔隙水壓增加量較前者大，使  $\alpha=1.32$  情況的有效應力比  $\alpha=3.08$  者有較大的降低，故其地表隆起量較大。



(a) 初始狀態



(b) 120 天後

圖 9 參數  $\alpha=1.32$  之孔隙水壓分布圖

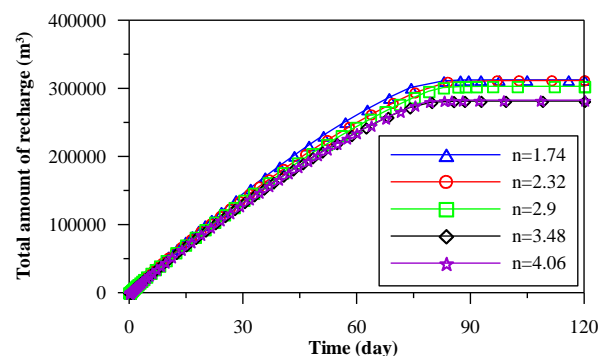
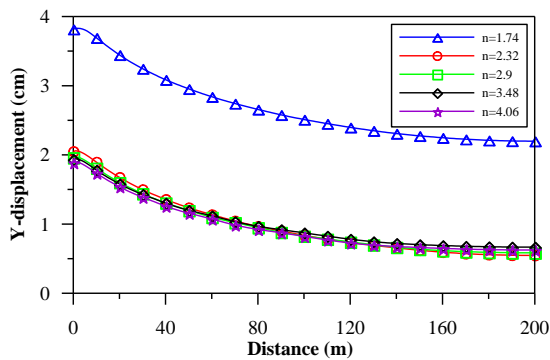


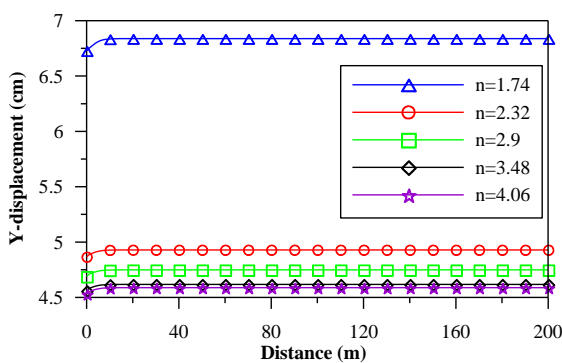
圖 10 不同參數  $n$  之總補注量比較圖( $\alpha=2.2$ )

如圖 10 所示， $n$  值於 1.74、2.32、2.9、3.48 及 4.06 時的最終總補注量分別為 312,372m<sup>3</sup>、311,450m<sup>3</sup>、302,926m<sup>3</sup>、281,293m<sup>3</sup> 及 282,626m<sup>3</sup>，將蓄水層完成地下水補注之時間分別約為 97 天、97 天、87 天、83 天及

83天，故得知，參數 $n$ 愈小時，補注量有較大之趨勢，而當 $n$ 為3.48與4.06時補注量無明顯差異，且 $n$ 值愈小，對蓄水層完成地下水補注所需之時間愈久。



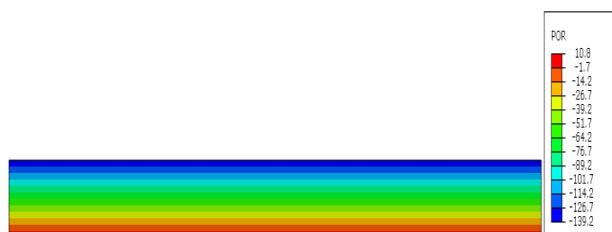
(a) 30 天後



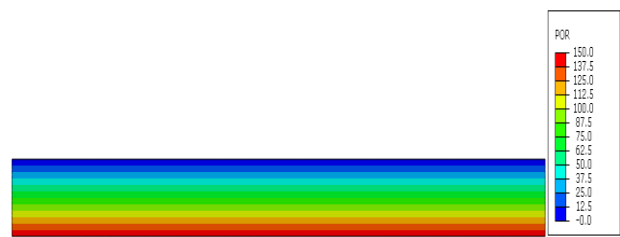
(b) 120 天後

圖 11 不同參數  $n$  之地表垂直位移比較圖

不同參數  $n$  對地表垂直位移之比較，如圖 11 所示，得知當  $n$  值愈小，垂直位移量愈大，尤其在  $n$  值減少 40% ( $n=1.74$ ) 與另外四組  $n$  值所產生之隆起量差異最明顯，其原因可能是初始孔隙水壓的不同所導致，由不同參數  $n$  之水分特徵曲線(圖 3)可看出，當  $n$  值愈大時，較小的基質吸力即能對應至初始飽和度 30%，反之，則需較大的基質吸力值才能對應至初始飽和度 30%。例如當  $n$  值為 4.06 時，孔隙水壓初始值設定為負 15kPa 即能對應至初始飽和度 30%，從初始應力平衡階段(圖 12(a))補注至 120 天後(圖 12(b))，孔隙水壓由負 64.2kPa(初始應力平衡後)增加至正 75kPa，增加量為 139.2kPa。



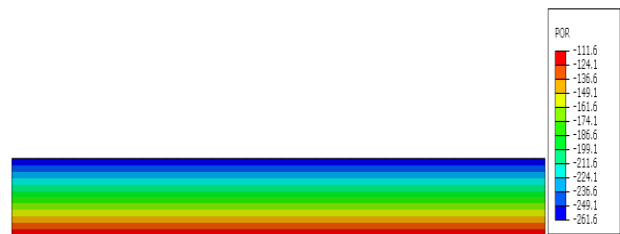
(a) 初始狀態



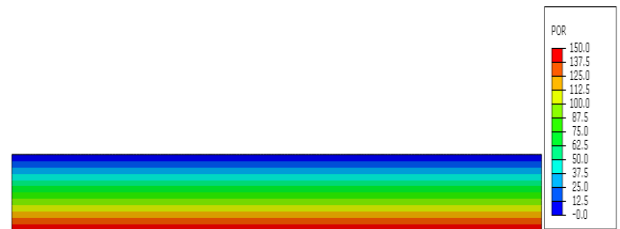
(b) 120 天後

圖 12 參數  $n=4.06$  之孔隙水壓分布圖

當  $n$  值為 1.74 時，孔隙水壓初始值設定為負 150kPa 才能對應至初始飽和度 30%，從初始應力平衡階段(圖 13(a))補注至 120 天後(圖 13(b))，孔隙水壓由負 186.6kPa(初始應力平衡後)提升為正 75kPa，增加了 261.6kPa 的孔隙水壓，孔隙水壓增加量比前者大，使土壤有效應力降低較多，故有  $n$  值愈小，地表隆起量愈大之現象。比較圖 7 與 11，當  $n$  值減少 40% ( $n=1.74$ ) 時，產生之隆起量比  $\alpha$  值減少 40% ( $\alpha=1.32$ ) 來的明顯。



(a) 初始狀態



(b) 120 天後

圖 13 參數  $n=1.74$  之孔隙水壓分布圖

## 4 結論

本研究主要以有限元素軟體 ABAQUS/Standard 中所提供之滲流/力學耦合分析模組來求解非飽和土壤之滲流問題，以軸對稱分析模式模擬人工補注井對一區域之蓄水層進行地下水補注，探討蓄水層土壤的 van Genuchten model 參數  $\alpha$  與  $n$  對地表高程變化、總補注量及補注時間之影響，最後將數值分析結果進行整理並歸納結論如下：

1. 當  $\alpha$  值愈小時，補注量愈多，地表隆起量愈大，但將蓄水層完成補注所需的時間愈長。所以，當  $\alpha$  值愈小時，補注井進行地下水補注的成效愈好。
2. 當  $n$  值愈小時，補注量有增加之趨勢，而  $n$  值等於 3.48 與 4.06 時，兩者對補注量的差異較不明顯。當  $n$  值愈小，對蓄水層完成補注所需的時間愈久。對

地表隆起量而言，當 $n$ 值愈小時，地表隆起量愈大，當 $n$ 值減少40%時產生之地表隆起量比 $\alpha$ 值減少40%有明顯差異。

## 誌謝

本研究承蒙國科會計畫(NSC102-2221-E-324-025)之經費支持，以及《財團法人國家實驗研究院·國家高速網路與計算中心》提供軟硬體資源，使本研究得以順利進行，特此致謝。

## 參考文獻

- 倪春發、許少華（1999），「人工池補注地下水水庫之效益初步模擬與影響因子」，第三屆地下水資源及水質保護研討會論文集。
- 范嘉程、黃俊龍（2012），「頁岩風化不飽和土壤之土壤水分特徵曲線」，中華水土保持學報，第43期頁197-205。
- 莊志威（2010），「地下水庫截水牆分析探討」，碩士論文，中原大學土木工程研究所。
- 翁琮哲（2001），「地下水補注功效之探討」，碩士論文，中原大學土木工程研究所。
- 劉致翔（2011），「地下水補注對沿海含水層海水入侵整治之數值分析」，碩士論文，成功大學水利及海洋工程學系。
- 劉建榮（2001），「van Genuchten 土壤特徵曲線參數對濕峰模擬與暫態補注量之影響」，碩士論文，逢甲大學土木及水利工程研究所。
- 蔡佩勳、林建翰、邱勢棠（2014），「人工湖補注地下水之力學分析」，第十二屆岩盤工程研究會論文集，頁493-501。
- 戴宏育（2013），「沿海地區海水入侵之數值研究-以屏東平原為例」，碩士論文，成功大學水利及海洋工程學系。
- Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils, 1<sup>st</sup> Edition, Wiley-Interscience.
- Harrison, B. A. and Blight, G. E. (2000). "The use of indicator tests to estimate the drying leg of the soil-water characteristic curve," Asian Conference on Unsaturation Soil, Balkema, Rotterdam.
- van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp. 892-898.