

# 以水力耦合模式探討不同複雜度地質模型 對地層下陷模擬之影響—以雲林地區為例

## The Influence of Geological Models with Different Complexity on Land Subsidence Simulation Based on a Coupled Hydro- Mechanical Model – A Case Study in Yunlin County

國立中央大學應用地質研究所

碩士生

助理教授

楊詠涵

王士榮

Yung-Han Yang

Shih-Jung Wang

### 摘 要

地層下陷的行為與特徵會隨著區域地質條件與地質架構的不同而有所差異，透過可靠的地質模型可以準確預測地層下陷的規模與範圍，並有助於儘早地規劃緩解之措施。考慮到地質材料分布在地層下陷模擬的重要性，本研究擬探討不同複雜度水文地質架構對地層下陷模擬的影響。本研究參考雲林地區地層下陷區之水文地質剖面，在有限元素軟體 COMSOL MULTIPHYSICS 中建置不同複雜度的水文地質模型，其中分為假想(synthetic)模型及現地(in-situ)模型。本文以 Biot 耦合孔彈性理論為基礎，模擬土體隨時間排水與壓密的過程，並使用相對敏感度(relative sensitivity)在層狀模型中進行參數敏感性分析。最後在現地模型中採用與變形效應引起之非線性參數，探討土體特性在排水與壓密的過程中變化之情形。本研究結果顯示，在均質模型中，當材料中水壓傳遞速度顯著慢於應力傳遞時，力平衡以及水壓變化所引起的沉陷量便可以區分。層狀模型中的沉陷量主要受阻水層控制，底部阻水層會在水頭停止下降後持續排水與壓密。參數敏感性分析結果顯示，楊式模數、帕松比與滲透性對沉陷量較為敏感，而孔隙率則不敏感。其中，滲透性之敏感度將隨時間變化，並在水頭下降期間對沉陷量的影響較為顯著。整體而言，阻水層參數與含水層參數相比更為敏感。在現地模型中，累積沉陷量主要來自阻水層的壓應變，而阻水層的厚度影響其排水速度。在現地模型增加複雜度使得地層下陷情形更為局部，並有較大的最大沉陷量。另外，在現地模型中考慮非線性參數，孔隙率與滲透性將隨土體變形而減小，楊氏模數則隨土體變形而增加。因此，阻水層的排水速度與壓縮性受非線性參數影響，使得整體沉陷量減少。

關鍵詞：水力耦合模式，地質模型複雜度，地層下陷模擬，參數敏感性分析，非線性參數

## Abstract

Local geological conditions and geological structure affect the behavior and characteristics of land subsidence. For land subsidence caused by groundwater overexploitation, reliable hydrogeological models can accurately predict the scale and extent of subsidence and help the planning of mitigation measures. Considering the importance of geological material distribution, the aim of this study is to investigate the influence of geological models with different complexity on land subsidence simulation. This study constructs synthetic models and in-situ models in a finite element software, COMSOL MULTIPHYSICS, using the hydrogeological cross section in Yunlin County, where is currently suffering serious land subsidence. Based on Biot's poroelasticity theory, the interaction of water drainage and consolidation processes in soil body is simulated. Parameter sensitivity analysis is performed in a synthetic model using the relative sensitivity. The nonlinear parameters are adopted in an in-situ model to explore the variations of soil properties during the deformation process. The results show that deformation caused by the water pressure transferring or force equilibrium can be distinguished in a homogeneous model when the permeability of material is significantly low. The land subsidence quantity in a layered model is mainly contributed by aquitards. In addition, the aquitards at the bottom continue to drain and consolidate after the hydraulic head stops decreasing, which shows the delay phenomenon. The results of parameter sensitivity analysis show that Young's modulus, Poisson's ratio, and permeability are sensitive to land subsidence, while porosity is insensitive. Moreover, the sensitivity of permeability varies with time and it is the most sensitive parameter in land subsidence assessment during the period of hydraulic head decrease. Overall, the parameters in aquitard are more sensitive than in aquifer. For in-situ models, the accumulated subsidence is mainly caused by the compressive strain of aquitard. The aquitard thickness affects its drainage time. Adding complexity to the in-situ model makes the subsidence more localized and has a large quantity of maximum land subsidence. Considering nonlinear parameters in an in-situ model, the porosity and permeability decrease with soil deformation, whereas Young's modulus increases. Therefore, the drainage and compressibility of aquitards are affected by nonlinear parameters, which reduces the subsidence in the entire model.

Keywords: coupled hydro-mechanical model , geological model complexity , land subsidence simulation , parameter sensitivity analysis , nonlinear parameters

## 一、前言

地層下陷監測數據顯示，雲林地區之下陷率自民國 81 年以來並無減緩現象，至今仍為台灣嚴重地層下陷區，在民國 110 年最大年平均下陷速率達 7.8cm/yr。雲林下陷中心在民國 85 年後由沿海地區向內陸地區轉移[13]，目前之主沉陷區在元長鄉與土庫鎮一帶，且涵蓋至高鐵路段影響其結構安全。為了有效治理因超抽地下水而引發之地層下陷，確切了解雲林地區之地層下陷機制為首要目標。

先前研究已表明，地層下陷的行為與特徵主要受到地質材料分布的影響，會隨著區域地質條件與地質架構的不同而有所差異[4][12]。因此，透過可靠的地質模型可以準確預測地層下陷的規模與範圍，並有助於儘早地規劃緩解之措施[15]。然而，地質模型的建構與計算通常受限於量測方法、地質條件變異性與複雜度高，使得模型中的地質架構難以與真實地質條件完全相符，存在著地質模型之不確定性[14][18]。近年來因抽取地下水導致地層下陷之案例研究，也多以簡化之層狀含水層系統進行模擬[7][11]。

考慮到地質模型之材料分布在地層下陷模擬的重要性，本研究參考雲林地層下陷區其中一個水文地質剖面(剖面位置如圖 1 所示)，在有限元素軟體 COMSOL MULTIPHYSICS 中建置不同複雜度的水文地質模型，並以 Biot 理論為基礎[1][2]，探討水文地質架構對地層下陷模擬的影響。接著，在假想模型中進行參數敏感性分析，以釐清在耦合模式中各材料參數對地層下陷行為的影響。最後，在現地模型中建立非線性參數系統，探討土體特性在排水與壓密的過程中變化對地層下陷行為的影響。

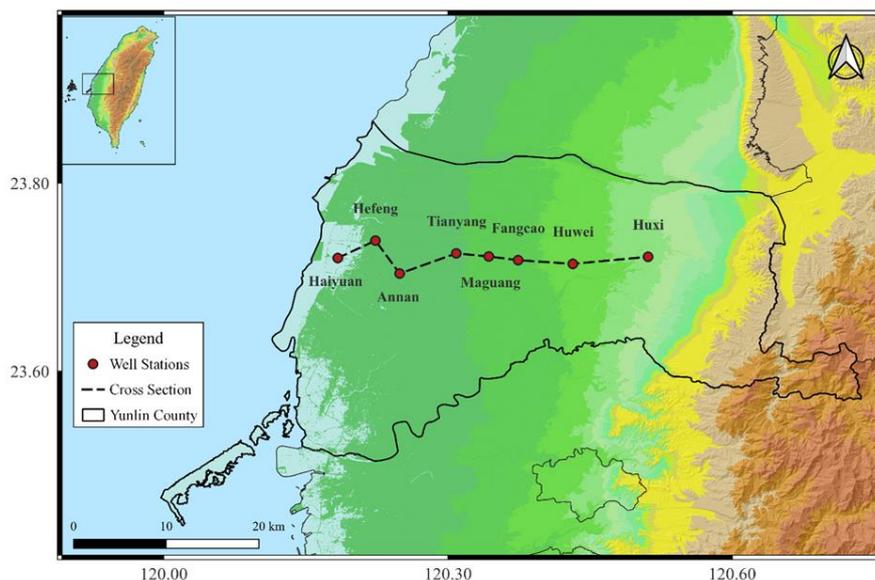


圖 1 地質模型建構所參考之水文地質剖面(海園-虎溪)地理位置。

## 二、研究方法

### 2-1 孔彈性理論控制方程式

本研究以有限元素軟體 COMSOL MULTIPHYSICS 中的 Biot 孔彈性理論進行數值模擬，其控制方程式以土體位移及孔隙水壓作為因變量，同時計算暫態之土體變形與水壓變化，可用以描述飽和(saturated)狀態下彈性孔隙介質中流體流動與固體變形之交互作用[3][9]。

在重力的作用下，將應力與應變、應變與位移之關係帶入力平衡方程式後，孔隙介質中固體變形的控制方程式可寫為：

$$G\nabla^2 u_i + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_k} = \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} - (\rho_s + n\rho_f)g \quad (1)$$

其中 $G$ 為剪力模數， $\nu$ 為泊松比， $u_i$ 為位移分量。 $\alpha$ 為 Biot-Willis 係數，又稱為 Biot's 有效應力係數， $p$ 為孔隙水壓， $\rho_s$ 為固體密度， $\rho_f$ 為流體密度， $n$ 為孔隙率， $g$ 為重力加速度。

在孔彈性理論中，孔隙流體將依循達西定律，固體體積、流體含量與孔隙水壓之本構關係式以質量守恆定律推導後，可以得到孔隙介質中流體流動之控制方程式：

$$\alpha \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + S \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 p \quad (2)$$

其中 $\nabla \cdot \mathbf{u}$ 為體積應變， $S$ 為儲水係數， $t$ 為時間， $k$ 為固體滲透率(permeability)， $\mu$ 為流體動黏滯係數。

### 2-2 非線性參數

考慮到土體變形可能會造成土體材料特性的改變，進而影響流體與土體在地層中的耦合行為。本研究引用在 Wang and Hsu (2009)中參數因土體變形而變化之關係式[16]，在 COMSOL Multiphysics 中建立非線性參數(nonlinear parameter)系統，其中孔隙率、滲透率及楊氏模數會隨不同時間之體積應變所變化：

$$n_1 = \frac{n_0 + e}{1 + e} \cdot k_1 = k_0 \frac{\left(1 + \frac{e}{n_0}\right)^3}{1 + e} \cdot E_1 = E_0 \left(\frac{1}{1 + e}\right)^2 \quad (3)$$

其中下標 0 表示該參數原始狀態，而 1 表示該參數變形後狀態， $n$ 為孔隙率， $k$ 為滲透率， $E$ 為楊氏模數， $e$ 為體積應變。因此，在本研究的非線性參數系統中，不同時間點之孔隙率、滲透率與楊氏模數，可以分別由式(3)計算得出該參數受變形效應之改變情形。

### 2-3 參數敏感性分析

傳統的參數敏感性理論中，將  $J$  定義為一個系統中的特性，其特性由不同參數  $j = (j_1, j_2 \dots j_n)$  所組成，而  $J^*$  被定義為該系統中的參考特性，由參考參數  $j^* = (j_1^*, j_2^* \dots j_n^*)$  所組成。耦合模型中水力與力學參數的因次不同，無法以傳統的敏感性分析比較不同參數的敏感度。因此，本研究採用 Chen 等人(2014)所提出之參數相對敏感度探討模型中各參數對地層下陷模擬的影響[5]，其中以垂向位移量作為系統特性  $J$ ，各參數則被表示為  $J_i$ 。其定義如下：

$$A = \frac{\frac{g(j_i^* + \Delta j_i) - g(j_i^*)}{g(j_i^*)}}{\frac{\Delta j_i}{j_i^*}} = \frac{J - J^*}{\frac{\Delta j_i}{j_i^*}} \quad (4)$$

其中  $A$  為相對敏感度， $\frac{\Delta j_i}{j_i^*}$  為參數值對參考參數值的百分比變化量(fractional variation)，而  $\frac{J - J^*}{J^*}$  為垂向位移量對參考垂向位移量的百分比變化量。因此，相對敏感度計算後為無因次值，可用於分析並比較不同參數對地層下陷的影響。當  $|A|$  值愈高，表示相同的參數變化可造成愈大的垂向位移量變化，也就是地層下陷對該參數愈敏感。

### 三、數值模型建置

#### 3-1 地質模型架構

為了探討在耦合模式下不同複雜度地質模型對地層下陷模擬的影響，本研究共建立了四種不同的水文地質模型。模型分為假想(Synthetic)與現地(In-situ)模型，假想模型以均質層狀材料所構成，空間尺度較小，而現地模型則是以鑽井資料所繪製之地質剖面所建置，其空間尺度較大並可同時包含扇頂、扇央及扇尾之材料訊息。其中，現地模型依地質架構複雜度分為水利署層狀模型與地調所水文地質模型。模型剖面及範圍可參考圖 2，地質模型架構如圖 3 所示。

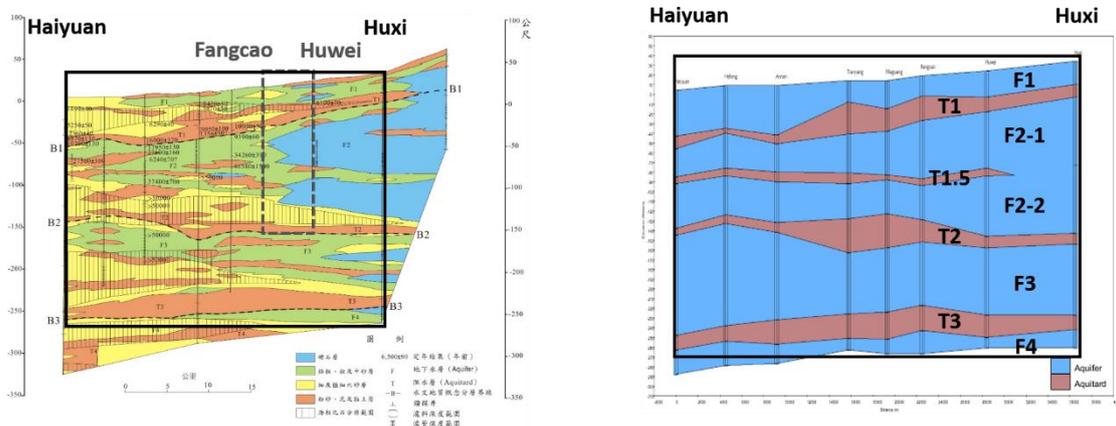


圖 2 假想模型與現地模型於水文地質剖面之建置範圍。左圖為地調所繪製之水文地質剖面，其中灰色虛線框為假想模型範圍，黑色實線為現地模型範圍。右圖為依據水利署提供各鑽井分層厚度所構建之分層剖面。

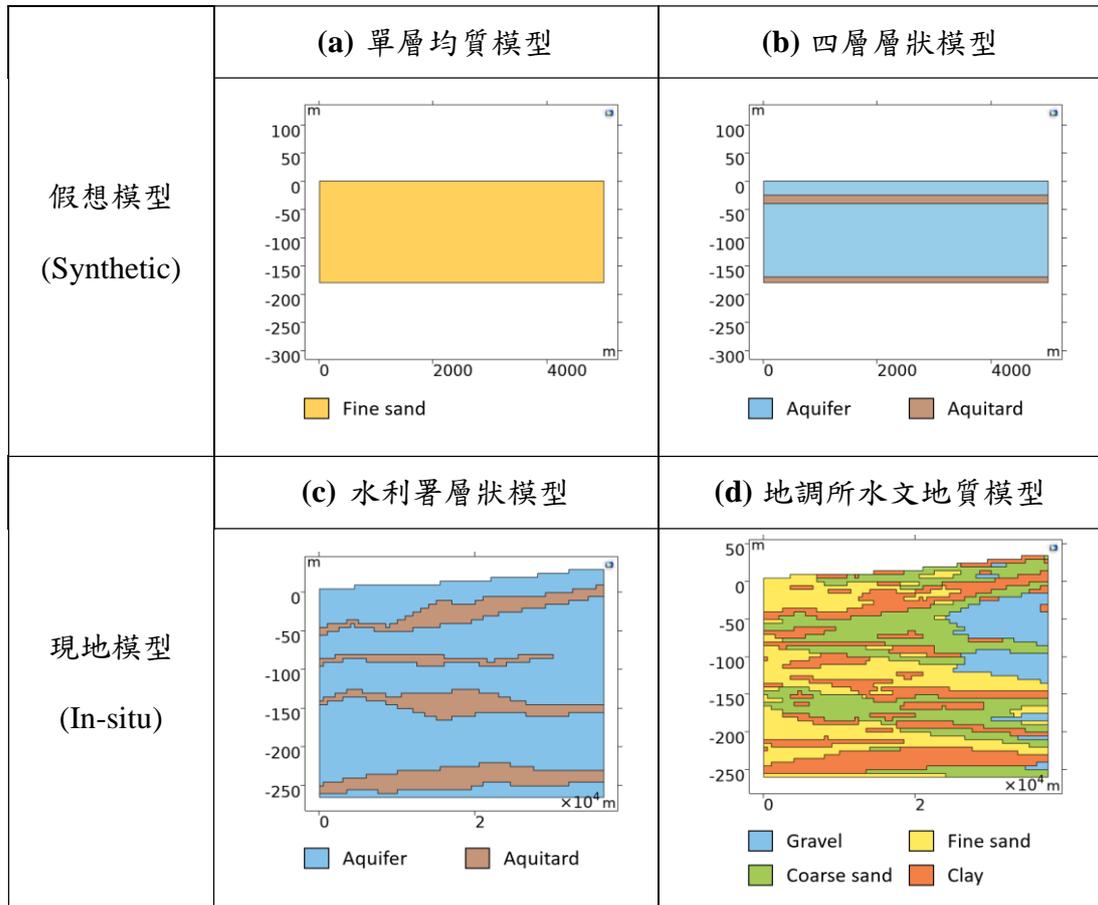


圖 3 本研究之地質模型架構。模型(a)-(d)在本文依序簡稱為模型一、模型二、模型三與模型四。

### 3-2 邊界條件與水力條件變化情境

#### 3-2-1 力學邊界設定

假設各地質模型之土壤材料沉積於基岩之上，並在側邊受到周圍岩土之圍壓約束，將底部邊界與側向邊界設為滾動邊界。將頂部邊界設為自由邊界，即假設其邊界不受任何拘束，可自由地在法線與切線方向移動。

#### 3-2-2 水力邊界設定

本研究之水力邊界設定包含了無流量邊界、恆定水頭邊界、瞬態水頭邊界與瞬態質量來源域(Transient mass source)。各模型中兩側邊界設置為水頭邊界，地下水流由右側(扇頂)向左側(扇尾)流動，底部基岩為不透水，並不考慮降雨補注流量，頂部邊界、底部邊界與黏土材料之側向邊界被設為無流量邊界。

接著，以水頭(hydraulic head)定義整個模型的水力狀態，在模型一中僅右邊界水頭可隨時間變化，左邊界為定水頭。為了探討水文地質架構對地層下陷行為

的影響，在模型二、模型三與模型四之含水層區域另外設置了質量來源，經由計算地下水流經單位土體體積之質量通量來模擬整個含水層的水力條件變化一致。

### 3-2-3 水力條件變化情境

本研究將水力條件的變化分為三種情境(圖 4)，情境 1 與情境 2 僅套用在假想模型中，情境 2 用以探討長年來的季節性水頭變化對地層下陷的影響，其中依在枯水期的水頭下降量分為情境 2-1、2-2 與 2-3。情境 1 即為情境 2-1 的一部分，套用在模型一探討最為基礎的水力行為與物理機制。情境 3 參考自和豐站與鄰近的中山站地下水位歷線圖[17]，地下水位在和豐站從民國 64 年開始逐漸下降 15 公尺，並於民國 78 年後進入低水位穩定期，此情境先套用至模型 2 驗證質量來源的計算式，再套用至現地模型探討地質架構複雜度對地層下陷模擬結果的影響。

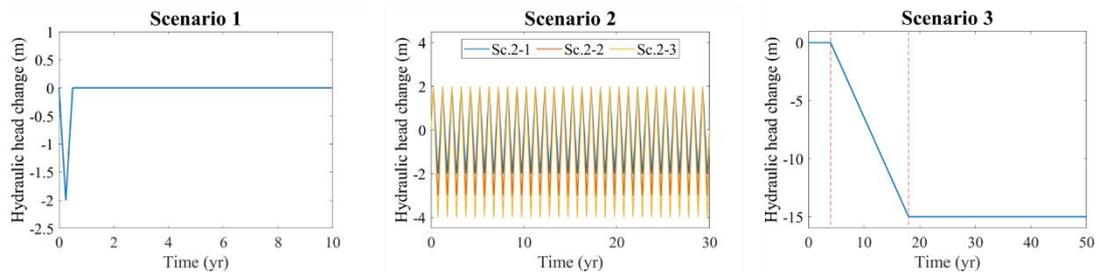


圖 4 三個模擬情境隨時間的水頭變化量

### 3-3 初始條件

藉由情境 3 後期之低水位穩定期，模型二、模型三與模型四以近 20 年來之水位觀測數據之平均值回推 15 公尺作為初始值。本研究使用預運行(pre-run)對水頭初始值穩態求解[8]，再以此穩態解當作接下來地層下陷模擬之初始條件。因此，模型之初始狀態在重力平衡下為靜水壓狀態(hydrostatic state)，在靜水壓狀態的土體變形量為零，如圖 5 所示。

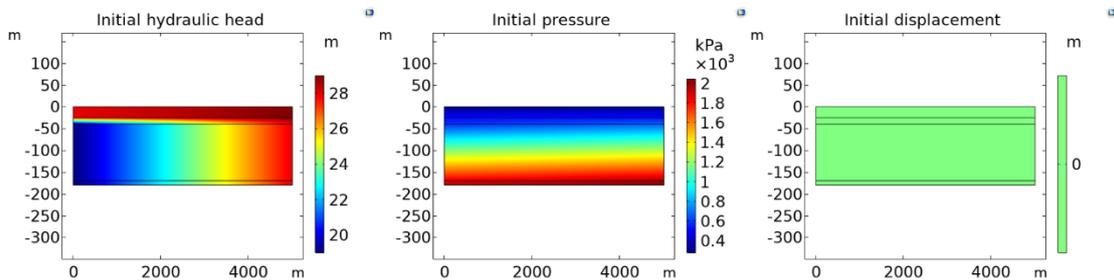


圖 5 模型二之初始靜水壓狀態與其對應變形量。

## 四、結果與討論

### 4-1 假想模型之水力機制探討與參數敏感性分析

在模型一中模擬情境 1 之結果顯示(圖 6)，當材料中水壓傳遞速度顯著慢於應力傳遞時，力平衡以及水壓變化在模型中心所引起的沉陷量便可以區分。

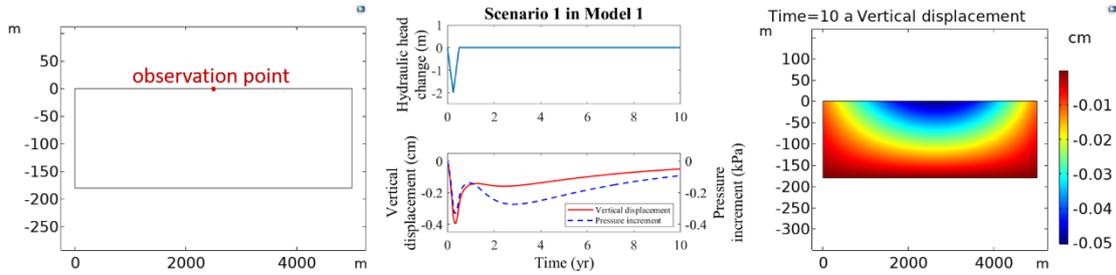


圖 6 模型一在情境 1 中表面中心點(左)之垂向位移量與水壓變化關係(中)以及 10 年後的垂向位移量(右)。

在模型一中模擬季節性水頭變化之結果顯示，枯水期下降量愈多，前期的下陷趨勢愈明顯，且達到平穩的時間愈長，平穩時的下陷量愈高。由此可見，當用水量長期高於補注量時，即使補注來源穩定，地層下陷仍會發生。

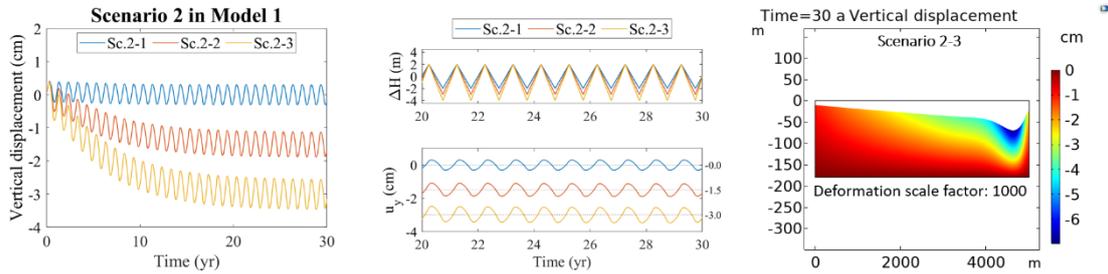


圖 7 模型一在情境 2 中表面中心點之垂向位移量(左)、垂向位移量穩定期之比較(中)及情境 2-3 在 30 年後之垂向位移量與其變形情形。

模型二情境 3 之模擬結果顯示(圖 8)，在低水位穩定期，下陷仍持續發生，原因為底部阻水層在水頭停止下降後持續排水與壓密，而沉陷量主要受阻水層控制。

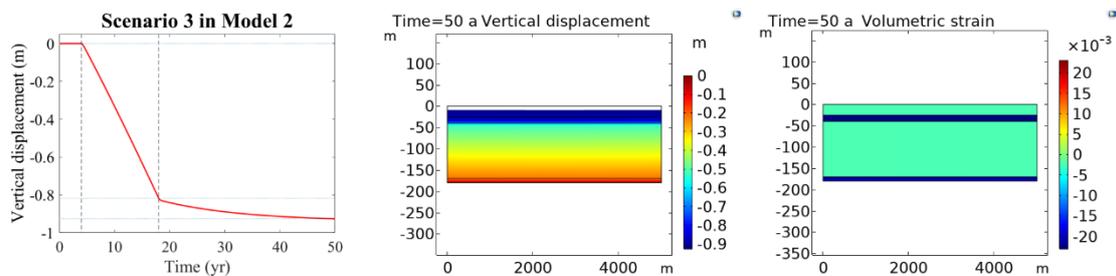


圖 8 模型二在情境 3 中表面中心點之垂向位移量(左)、50 年後的垂向位移量及其變形情形(中)與體積應變(右)。

以情境 1 在模型一的模擬結果進行參數敏感性分析(圖 9),結果顯示滲透性、楊氏模數與帕松比對水力行為較為敏感,而乾密度與孔隙率則不敏感。觀察改變滲透性與楊氏模數的模擬結果後發現,流體流動性或土體硬度愈高,水壓在土體的傳遞愈快。接著,以情境 3 在模型二的垂向位移量計算相對敏感度,分析結果顯示楊式模數、帕松比與滲透性對沉陷量較為敏感,且滲透性敏感度將隨時間變化。整體而言,阻水層參數比含水層參數更為敏感。

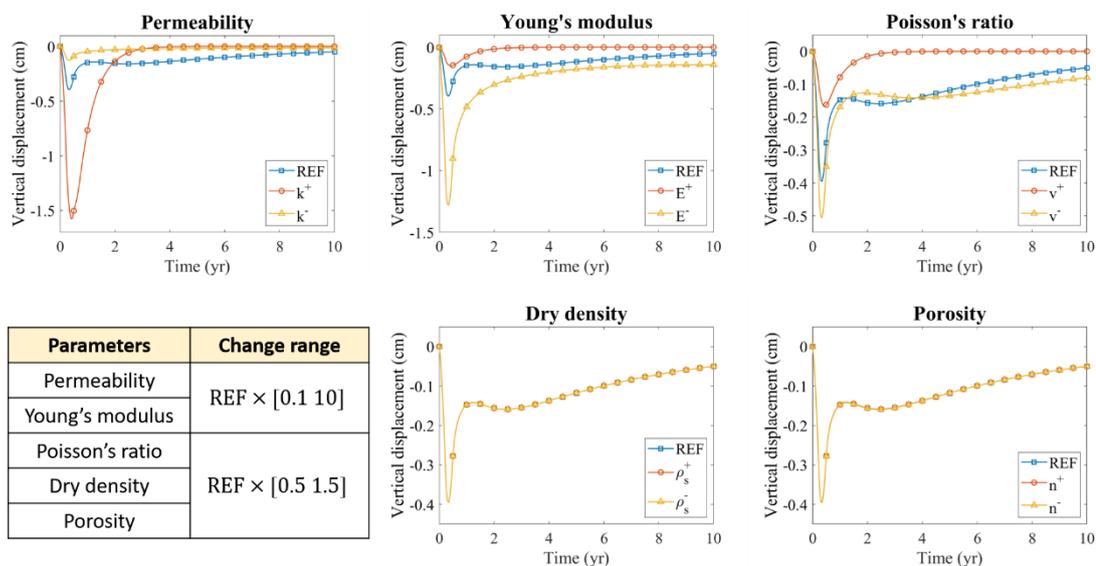


圖 9 模型一參數變化對水力行為之影響。

#### 4-2 現地模型之複雜度與非線性參數的影響

本研究之現地模型以情境 3 進行模擬,結果顯示沉陷量主要來自阻水層的壓應變,而阻水層之厚度影響其排水速度。因此,現地模型之地層下陷情形主要受黏土材料架構所影響。由圖 10 的模擬結果可見,在現地模型增加複雜度(模型四)後,累積沉陷量在 50 年後增加了 0.1 公尺,地層下陷情形更為局部。另外,在模型四中考慮非線性參數,孔隙率與滲透性將隨土體變形而減小,楊氏模數則隨土體變形而增加。因此,阻水層的排水速度與土體硬度受非線性參數影響,使得整體沉陷量減少,最大沉陷量減少了 0.54 公尺。

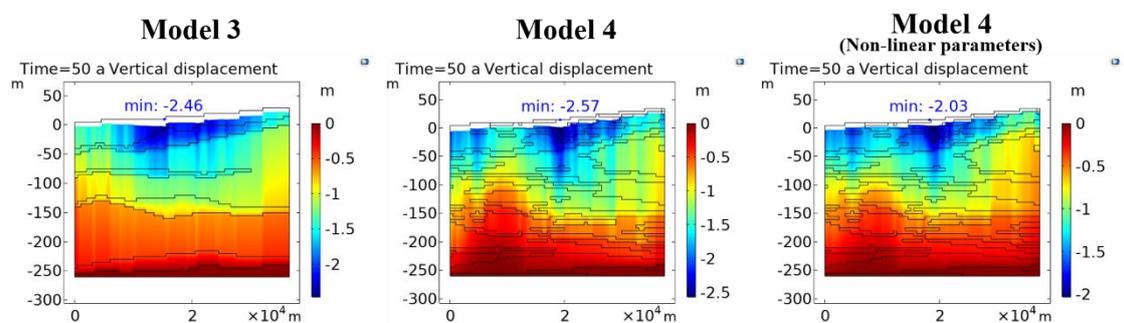


圖 10 模型三、模型四與考慮非線性參數之模擬結果比較。

## 五、結論

本研究以水力耦合模式探討了不同複雜度之地質架構對地層下陷模擬的影響，並在假想模型中討論土體參數對水力耦合行為及沉陷量之影響，最後在現地模型中以非線性參數探討土體材料特性隨著壓密與排水過程變化對整體下陷量的影響，結論如下：

1. 以質量來源作為水力條件設定，可以模擬整個含水層系統同時間的水頭變化，並得以探討不同複雜度之地質架構的影響。
2. 在水力耦合模式中，土體的排水行為不僅受滲透性所控制，土體之彈性模數亦具有顯著的影響。對沉陷量的參數敏感性分析中，以楊氏模數最為敏感。
3. 沉陷量主要來自黏土層的壓應變，現地模型之延遲下陷則來自於厚黏土層較為緩慢的排水與壓密。因此，各地區地層下陷行為受黏土層的比例與厚薄度所控制。在現地模型中增加複雜度造成最大沉陷量的增加，並使得沉陷中心更為明顯。
4. 非線性參數中滲透性與楊氏模數的變化影響了土體的排水速度與壓縮性，最終使模型整體沉陷量減小。

## 六、參考文獻

- [1] Biot, M. A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics* 12, 155.
- [2] Biot, M.A. (1955) Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid. *Journal of Applied Physics*, 26, 182-185.
- [3] Biot, M. A. (1962). Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media, *J. Appl. Phys.*, vol. 33, pp. 1482-1498.
- [4] Bozzano, F., Esposito, C., Franchi, S., Mazzanti, P., Perissin, D., Rocca, A., & Romano, E. (2015). Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: The Acque Albule Plain case study. *Remote Sensing of Environment*, 168, 219–238.
- [5] Chen, X., Luo, Z., and Zhou, S. (2014). Influences of soil hydraulic and mechanical parameters on land subsidence and ground fissures caused by groundwater exploitation. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(1), 155-164.
- [6] Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.
- [7] Fernández-Merodo, J. A., Ezquerro, P., Manzanal, D., Béjar-Pizarro, M., Mateos,

- R. M., Guardiola-Albert, C., ... Herrera, G. (2021). Modeling historical subsidence due to groundwater withdrawal in the Alto Guadalentín aquifer-system (Spain). *Engineering Geology*, 283, 105998.
- [8] Holzbecher, E. (2017). Analytical solution for the steady poroelastic state under influence of gravity. *COMSOL 2017 Conference*.
- [9] Jiang, G. Y. (2021). Theoretical analysis of ground displacements induced by deep fluid injection based on fully-coupled poroelastic simulation. *Geodesy and Geodynamics*, 12(3), 197-210.
- [10] Kézdi, Á., & Rétháti, L. (1974). *Handbook of soil mechanics*. Amsterdam: Elsevier.
- [11] Kihm, J. H., Kim, J. M., Song, S. H., & Lee, G. S. (2007). Three-dimensional numerical simulation of fully coupled groundwater flow and land deformation due to groundwater pumping in an unsaturated fluvial aquifer system. *Journal of Hydrology*, 335(1-2), 1–14.
- [12] Liu, C. H., Pan, Y-W., Liao, J-J., Huang, C. T., & Ouyang, S. (2004). Characterization of land subsidence in the Choshui River alluvial fan, Taiwan. *Environmental Geology*, 45(8), 1154-1166.
- [13] Lu, C. H., Ni, C. F., Chang, C. P., Chen, Y. A. & Yen, J. Y. (2016). Geostatistical data fusion of multiple type observations to improve land subsidence monitoring resolution in the Choushui river fluvial plain, Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(4), 505–520.
- [14] Moslehi, M., Rajagopal, R., & de Barros, F. P. J. (2015). Optimal allocation of computational resources in hydrogeological models under uncertainty. *Advances in Water Resources*, 83, 299–309.
- [15] Musso, G., Volonté, G., Gemelli, F., Corradi, A., Nguyen, S. K., Lancellotta, R., Brignoli, M., & Mantica, S. (2021) Evaluating the subsidence above gas reservoirs with an elasto-viscoplastic constitutive law. Laboratory evidences and case histories. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 28: 100246.
- [16] Wang, S. J. and Hsu, K. C. (2009). Dynamics of deformation and water flow in heterogeneous porous media and its impact on soil properties. *Hydrological Processes* 23(12): 3569-3582.
- [17] 江崇榮、林燕初、陳建良 (2011)。濁水溪沖積扇地下水位與地表高程互動之模式與應用。地質，第 30 卷，第二期，32-35 頁。
- [18] 董家鈞 (2020)。知之為知之，不知為不知，是知也：淺談地質模型不確定性。大地技師，第 20 卷，72-83 頁。