

Development of Numerical Model of Land Subsidence (3)

Key words: uncouple one-dimensional land subsidence, three-dimensional land subsidence, finite analytic method, layered integration

ABSTRACT

The goals of this study are not only to develop but also to apply an accurate and efficient large area land-subsidence model, that is, using uncouple one-dimensional model to simulate large area subsidence, whereas the three-dimensional model is applied to the locally severe land-subsidence area. In the previous two-year study, an uncouple one-dimensional large area land subsidence model was proposed and applied to simulate the subsidence in both Tzuo-Suei River Basin and Ping-Tung Plain. The simulated results agreed with the trend of measured data.

In this year (the last year of this study), a three-dimensional land subsidence model is further proposed by adopting finite analytic method and the method of layered integration. After this three-dimensional model is verified by some analytical solutions, it is applied to Kou-Wu area. In this three-dimensional simulation, the boundary conditions of vertical displacements and pore water pressure are given from the computational results of one-dimensional model, whereas the gradients of horizontal displacements at the boundary are ignored in this study with the assumption that the variations of horizontal displacements at boundary are very smooth. The computational results show that the vertical and horizontal displacements are 11.08 cm and 0.53 cm respectively at Kou-Wu from Oct, 1996 to Feb, 1998. However, the vertical displacements are 13.03 by adopting uncouple one-dimensional model. The result reveals the fact that the vertical displacements of three-dimensional model are smaller than those of one-dimensional model due to energy viewpoint.

摘要

本研究之目的在於發展並應用一理論較廣義且適合大區域計算之較準確又效率高的地層下陷計算模式，最終得到由國人自行發展最適合處理臺灣地層下陷計算問題的有效方法。在前兩年研究計劃中已完成一維非耦合地層下陷模式之建立與驗證，並應用於濁水溪沖積扇與屏東平原之地層下陷模擬，且得到與實測資料趨勢吻合之模擬結果。

今年為此研究計劃之最後一年，研究中更進一步完成無因次三維地層下陷模式之建立，並且選擇半無限空間拘限含水層單井抽水與半無限空間穩點源抽水以及半無限空間非拘限含水層單井抽水等三個有解析解之案例加以驗證。模式驗證無誤後，選擇雲林縣下陷嚴重區域口湖會水附近做局部三維地層下陷模擬。模擬結果顯示，口湖會水處於 85 年 10 月至 87 年 2 月間之地層下陷量以三維模式模擬結果為 11.08 cm，而以一維模式模擬之結果則為 13.03 cm，實測值為 15.33 cm。此外，口湖會水處之水平位移為 0.53 cm。由能量觀點而言，以三維模式模擬出之地層下陷量結果應較一維模擬結果為少，因為三維模擬時加入考慮水平方向位移時所需之能量，而一維模擬時僅考慮垂直方向之變形能量，所以模擬結果應屬合理。

目錄

英文摘要.....	i
中文摘要.....	ii
目錄.....	iii
圖表錄.....	v
一、緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究方法.....	3
1.4 本年度預期成果.....	5
二、地層下陷之理論基礎.....	6
2.1 三維地層下陷控制方程式.....	6
2.1.1 水流控制方程式.....	6
2.1.2 靜力平衡方程式.....	7
2.2 極限情況之地層下陷量階分析.....	8
三、一維非耦合地層下陷模式理論之建立.....	14
3.1 水流計算.....	14
3.1.1 水流控制方程式.....	14
3.1.2 初始條件.....	16
3.1.3 邊界條件.....	16
3.1.4 內插形狀函數.....	18
3.2 下陷量計算.....	19
3.3 總結模式中使用之方程式.....	19
3.4 有限解析法簡介.....	22
四、三維地層下陷模式理論之建立.....	26
4.1 分層積分控制方程式.....	27
4.1.1 控制方程式.....	27
4.1.2 邊界條件.....	28
4.1.3 層與層間之連接條件.....	30
4.1.4 初始條件.....	30

4.2 無因次分層積分控制方程式.....	30
五、三維地層下陷模式之驗證與應用	
5.1 模式之驗證.....	33
5.1.1 半無限空間拘限含水層單井抽水驗證案例.....	33
5.1.2 半無限空間穩態點源抽水驗證案例.....	34
5.1.3 半無限空間非拘限含水層單井抽水驗證案例.....	34
5.2 局部三維地層下陷模擬.....	35
六、結語.....	38
參考文獻.....	40

圖表錄

表 5-1.濁水溪沖積扇各測站之分層地層厚度.....	43
表 5-2.濁水溪沖積扇地質參數表.....	45
表 5-3.雲林地區 20 鄉鎮水井抽水量調查.....	46
表 5-4.濁水溪沖積扇抽水量分層分配表.....	47
表 5-5.濁水溪沖積扇各鄉鎮年入滲量表.....	48
圖 3-1.受壓含水層分層深度積分示意圖.....	49
圖 3-2.非受壓含水層分層深度積分示意圖.....	50
圖 3-3.垂直方向介面物理連接條件示意圖.....	51
圖 3-4.水平方向介面物理連接條件示意圖.....	52
圖 3-5.有限解析法說明圖.....	53
圖 5-1.半無限空間拘限含水層單井抽水驗證案例垂向示意圖.....	54
圖 5-2.半無限空間拘限含水層單井抽水驗證案例水平示意圖.....	54
圖 5-3 半無限空間拘限含水層單井抽水驗證案例水頭隨時間變化圖.....	55
圖 5-4 半無限空間拘限含水層單井抽水驗證案例水平位移隨時間變化圖.....	56
圖 5-5 半無限空間拘限含水層單井抽水驗證案例垂直位移隨時間變化圖.....	57
圖 5-6 半無限空間穩態點源抽水驗證案例垂直示意圖.....	58
圖 5-7 半無限空間穩態點源抽水驗證案例水平位移變化圖(地表為可透水).....	59
圖 5-8 半無限空間穩態點源抽水驗證案例垂直位移變化圖(地表為可透水).....	60
圖 5-9 半無限空間穩態點源抽水驗證案例水頭變化圖(地表為不可透水).....	61
圖 5-10 半無限空間穩態點源抽水驗證案例水平位移變化圖(地表為不可透水).....	62
圖 5-11 半無限空間穩態點源抽水驗證案例垂直位移變化圖(地表為不可透水).....	63
圖 5-12.半無限空間非拘限含水層單井抽水驗證案例垂向示意圖.....	64
圖 5-13.半無限空間非拘限含水層單井抽水驗證案例水平示意圖.....	64
圖 5-14 半無限空間非拘限含水層單井抽水驗證案例水頭隨時間變化圖.....	65
圖 5-15 半無限空間非拘限含水層單井抽水驗證案例水平位移隨時間變化圖.....	66
圖 5-16 半無限空間非拘限含水層單井抽水驗證案例垂直位移隨時間變化圖.....	67
圖 5-17.濁水溪沖積扇地層下陷模擬垂直分層示意圖.....	68
圖 5-18.濁水溪沖積扇地層下陷模擬水平分區網格示意圖.....	69
圖 5-19.濁水溪沖積扇模擬區域邊界示意圖.....	70
圖 5-20.雲林地區 84/1-85/10 下陷量模擬結果.....	71
圖 5-21.雲林地區 85/10-87/2 下陷量模擬結果.....	72
圖 5-22.彰化地區 84/8-86/8 下陷量模擬結果.....	73
圖 5-23 85/10 至 87/2 口湖會水附近地層下陷等高線圖(實測結果).....	74
圖 5-24 85/10 至 87/2 口湖會水附近地層下陷等高線圖(一維地層下陷模擬結果).....	75
圖 5-25 85/10 至 87/2 口湖會水附近地層下陷等高線圖(三維地層下陷模擬結果).....	76
圖 5-26 85/10 至 87/2 口湖會水附近地層下陷立體曲面圖(實測結果).....	77
圖 5-27 85/10 至 87/2 口湖會水附近地層下陷立體曲面圖(一維地層下陷模擬結果).....	78
圖 5-28 85/10 至 87/2 口湖會水附近地層下陷立體曲面圖(三維地層下陷模擬結果).....	79

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

根據經濟部的一項資料顯示，國內地下水超抽嚴重，超抽量達三十三億噸，其結果造成一千一百七十平方公里的土地地層下陷。並由水利處與水資源局之地層下陷調查資料可知，目前發生較嚴重地層下陷之地區，包括台北、宜蘭、彰化、雲林、嘉義、高雄及屏東等沿海地區。其中最大的累計沉陷量發生於屏東沿海地區約 2.88 公尺，而以宜蘭沿海地區為較小約 0.5 公尺。事實上地下水超抽不但會造成地層下陷，沿海地區更可能因此導致海水入侵，地下水鹹化。地層一旦下陷就無法恢復舊觀，地下水鹹化更會將地下水資源破壞殆盡，所以地下水超抽引致地層下陷所產生的災害，其代價實在極大，至於沿海地區淹水對人民生活所造成的傷害與不便，就更不在話下了。由此可知，如何安全且有效地應用地下水資源，以防止地層下陷導致國土流失，儼然已成為一重要且迫切解決之課題。

國內對於地下水之調查分析，已有很大進展，例如江崇榮、賴典章、黃智昭、賴慈華、陳利貞（民國 85 年），劉聰桂、田巧玲、邱等輝、張炎銘（民國 85 年）。目前對於地層下陷的探討，則大多以調查、量測為主，例如蕭慶章（民國 79 年），簡俊彥、蔡正男、陳尚、林季麟（民國 79 年），廖日昇、李林少華、柳志錫、廖建順、林明煌（民國 79 年）等。解析研究如譚建國、呂志宗（民國 79 年）仍然循著 Hankel transform 加上 Laplace transform 的傳統方式處理之，僅適用於簡單的特例。數值研究方面，雖然近年陸續有些進展，例如簡化的 Terzaghi 一維模式（李德河等（民國 86 年），許澤善（民國 86 年）），Biot 三維有限元素法（葉弘德，葉高次（民國 85 年）），以及工研院利用商用程式 MODFLOW, COMPAC 計算水流及靜力平衡並結合 MAPINFO 作資料處理，見歐陽湘等（民國 86 年），不過

由於計算中對於變數（壓力，位移）間量階差異太大，抽水及沈陷的時間尺度不同，土壤非線性應力應變關係，以及土壤層與層間極大不同參數（例如見江崇榮（民國 86 年））的困難，在在都顯示地層下陷計算，尤其是大區域計算，仍有許多待探討及進一步研究的地方。

由上述可知，為解決臺灣地區之地層下陷問題，近年來不論中央、地方與學校投入地下水超抽導致地層下陷問題之防治研究的資源相當龐大。然而，由於是項問題千頭萬緒，牽涉極廣，因此幾年下來，政府機關與學術單位各自努力的結果，雖然已有一些成績，但似乎仍未能對此一影響民生至鉅的問題提出一套具體、有效的預測模式。緣於此，本研究之目的即在於發展並應用一適合大區域地層下陷預測模擬之數值計算模式，以作為日後如何有效且安全地運用地下水資源之基礎。

1.2 文獻回顧

地層下陷的研究方法，可概分為二大類。一為以模擬土壤反應的經驗式處理之（見 Corapcioglu(1984)之討論），一則建立在 Terzaghi 的有效應力(effective stress)理論上（見 Terzaghi(1925)）。由於前者侷限性較大，發展有限，故而後者的發展乃成為主流。基於有效應力理論，衍生出 Jacob(1968)的一維壓密理論(consolidation theory)，以及 Biot(1941)較完整的多孔彈性(poroelastic)三維壓密理論。

晚近的地層下陷研究，泰半皆由 Biot 氏的理論加以應用或延伸，其中較常被提起的有 Lewis and Schrefler(1978)利用有限元素法，假設軸對稱的威尼斯地層下陷研究；Corapcioglu and Brustaert(1977)的黏彈性土壤壓密；Safai and Pinder(1979)的飽和與非飽和土壤的沈陷研究等。當然其他如 Biot and Willis(1957)探討土壤壓密的彈性係

數，以及 Cooper(1966)對動座標的探討等，也都對這方面的研究有重要的貢獻。

在許多地層下陷的研究中，Bear and Corapcioglu(1981a,1981b)，Corapcioglu and Bear(1983)所提出的分層積分(layered integral)以探討區域沉陷(regional subsidence)的方法，經常被引用，公認極為出色。然而這個方法只談到含水層(aquifer)之沉陷，並未涵蓋阻水層(aquitard)的沉陷。最近 Fallou, Mei and Lee(1992)，Lee, Fallou and Mei(1992)以相當複雜的擾動(perturbation)展開法探討厚不透水層的沉陷問題。他們的方法固然因為太複雜而顯得不實用，但文中提到以 Hantush 的假設簡化處理不透水層及含水層的觀念卻頗值得參考。

最早期在模擬多含水層系統之水流時，都假設阻水層中之孔隙水壓變化為線性分佈，也就是不考慮所謂的 aquitard storage，如 Polubarinova-Kochina(1962)，Hantush and Jacob(1955)。但是此與實際之物理現象有所不符，所以 Hantush(1960)最早提出考慮 aquitard storage 在多含水層系統之水流中的影響。模擬多含水層系統之水流可直接運用三維模式，如 Frind and Verge(1978)，但用三維模式需耗用大量之記憶體，且計算時間長，使得直接運用三維模式做大區域之計算模擬不是一個好方法。所以在多含水層系統之水流中假設含水層之水流為水平流，而阻水層之水流為垂直流，如此不只簡化三維模式，又能考慮含水層與阻水層之交互作用(即 aquitard storage)，一般將此稱為擬三維模式(quasi-three dimensional model)。根據 Neumann and Witherpoon(1972)指出若含水層與阻水層之滲透率(permeability)相差兩階(order)或兩階以上時，擬三維模式之誤差一般小於 5%。

1.3 研究方法

為了探討地下水超抽導致地層下陷的問題，本研究中吾人提出以一維彈性土體壓密理論配合三維地下水流方程式建立之非耦合地層下陷數值計算模式，模擬因大區域超抽地下水引致之地層下陷，再以較準確之三維地層下陷理論模擬局部地層下陷嚴重區域之概念。如此，不但可有效地更可以準確地模擬地下水超抽導致之地層下陷。

在非耦合地層下陷數值計算模式中之地下水流計算方面，本研究比擬三維水流模式更進一步，阻水層與含水層皆不假設水流為垂直流與水平流，並引用分層深度積分概念處理之。為了使阻水層與含水層或含水層與含水層間之介面滿足孔隙水壓連續及水流通量連續，乃假設每個含水層與阻水層之孔隙水壓在垂直深度方向上符合二次函數變化關係。

此外，因為實際沉積性地下水流域地質的分佈並非如傳統擬三維水流模式中假設阻水層與含水層相間之層狀分佈現象在水平方向無限延伸之情況，所以為了要合理地解析水流在實際複雜地質分佈中流動之情形，研究中除了將地質依土壤之導水性質分層外，更進一步根據土層之不連續性做垂向虛擬分層。如此，模式對於區域性地下水之模擬，不但能保有以傳統擬三維水流概念模擬時之高效率特點，並且因為沒有傳統擬三維水流概念之限制，所以能模擬複雜三維地下水水流之現象。此外，為考量大區域計算與地質在水平方向之不連續性，研究中亦將模擬區域根據地質條件做適當之水平區域拆解，並以區與區間介面之孔隙水壓及水流通量需連續之連接條件，來建立數值計算模式。

至於三維地層下陷模式之發展，與一維非耦合地層下陷數值計算模式相同，採用最符合實際地質情況之分層積分方式來建立數值

計算模式。並以層與層間之水流需滿足壓力與通量連續且土體需符合位移與應力連續之條件加以連接，使其構成適當問題。此外，為了解決孔隙水壓與土體位移之量階及反應特徵時間尺度差異甚大，可能導致計算時發生不穩定情形，研究中更進一步以無因次三維地層下陷控制方程式來建立數值模式。

1.4 本年度預期成果

今年度為計劃之最後一年，在前兩年計劃中完成一為非耦合地層下陷之建立與驗證，並且實際應用於濁水溪沖積扇與屏東平原之地層下陷模擬，得到與實測資料趨勢吻合之結果。本年度中之研究目標為，進一步建立無因次三維地層下陷模式，在模式驗證無誤後選擇濁水溪沖積扇中地層下陷嚴重區域做局部三維地層下陷模擬。如此，便能完成本研究之最終目的(發展並應用一適合大區域地層下陷預測模擬之數值計算模式)。

第二章 地層下陷之理論基礎

2.1 三維地層下陷控制方程式

2.1.1 水流控制方程式

假設在固定座標及固定控制體積下，分別考慮流體與土體之質量守恆、即

$$\frac{\partial(n\rho_w S)}{\partial t} + \nabla \cdot (n\rho_w S \vec{V}_w) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-n)\rho_s \vec{V}_s] = 0 \quad (2.2)$$

其中 n 為孔隙率 (porosity)、 ρ_w 為流體之密度、 ρ_s 為土體之密度、 \vec{V}_s 為土體之移動速度、 \vec{V}_w 為流體之移動速度、 S 為飽和度。根據 Darcy 相對流速定律

$$\vec{q}_r = S n (\vec{V}_w - \vec{V}_s) = -\bar{K} \cdot \nabla h = -\bar{K} \cdot \nabla \left(z + \int \frac{dp}{\rho_w g} \right) \quad (2.3)$$

其中 \vec{q}_r 為達西相對流速、 \bar{K} 為水力傳導係數張量 (hydraulic conductivity tensor)、 p 為孔隙水壓。由式 (2.1)、式 (2.2)、式 (2.3) 化簡整理可推得三維非飽和水流控制方程式為

$$\nabla \cdot (\rho_w \vec{q}_r) + \rho_w S \nabla \cdot \vec{V}_s + n S \frac{d_s \rho_w}{dt} + \rho_w n \frac{d_s S}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

再定義流體壓縮係數

$$\beta = \frac{1}{\rho_w} \frac{d\rho_w}{dp} \quad (2.5)$$

假設水力傳導係數為均質且等向，並且忽略非飽和以及水流與土體對流項之影響，若以孔隙水壓 p 為因變數時則水流控制方程式可為

$$K \frac{\partial^2 p}{\alpha^2} + K \frac{\partial^2 p}{\beta^2} + K \frac{\partial^2 p}{\gamma^2} = \rho_w g \left(\frac{\partial^2 U_{sx}}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 U_{sy}}{\partial y \partial t} + \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z \partial t} + n\beta \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (2.6)$$

其中 U_{sx} 、 U_{sy} 與 U_{sz} 分別為土體在 x 、 y 與 z 方向之位移量。