

Study on the Land Subsidence Behavior Using Reverse
Calculation and Prediction

蘇苗彬
國立中興大學
土木工程系副教授

楊高明
國立中興大學
土木工程系碩士

陳育志
國立中興大學
土木工程系碩士

第二屆地下水資源及水質保護研討會

國立成功大學水利及海洋工程學系
國立成功大學資源工程學系
國立成功大學地球科學系
經濟部水利司

編印

中華民國八十六年元月九、十日

Study on the Land Subsidence Behavior Using Reverse Calculation and Prediction

蘇苗彬
國立中興大學
土木系副教授

楊高明
國立中興大學
土木系碩士

陳育志
國立中興大學
土木系碩士

摘要

國內地盤下陷問題之研究最早緣於台北盆地之地盤下陷，後來因自來水的使用普遍，使地下水使用減少，近年來沉陷量已有減緩的趨勢。而後西南沿海養殖業的地下水超抽，引起大量地盤下陷問題，其中濁水溪沖積扇平原之末端，由於地質結構特殊，地下水天然涵養速度甚慢，因此地盤下陷問題相當嚴重，估算沉陷量，防止地盤持續下陷，為重要課題。

本文利用 k_0 三軸試驗及配合水利局所取得之資料（長期地下水位變化、少數沉陷量資料），判斷土壤之現地應力狀態，亦即處於正常壓密或過壓密狀態，再根據小變形之觀念，將土壤限定於線彈性範圍中，以有限差分解 Terzaghi 單向度壓密理論，並利用試誤法調整參數，求得適合現場沉陷資料的地質參數，且歸納出分析區域內之共同特性，使此分析模式適用於大範圍，而達到僅利用地下水位變化資料就可分析地層下陷行為與預估沉陷量之目的。

文中選取雲林地區作沉陷行為分析，並以蚊港現場做試驗，來印證所選取之參數是否與現地地質狀況吻合，結果發現與蚊港現場之鑽探報告中所述地層材料的分佈是吻合的。

一、前言

一般分析地下水與地層下陷量之關係，若僅以地下水位與地層下陷量之比值比較，忽略土層現地的應力狀態，往往於同一地點因時間不同而有不同之比值且差異很大，無法歸納出一個結果。而國內水利局雖有長期之地下水資料，但並無完整之分析地下水位與地層

下陷量關係之方法。有鑑於此，本文利用 k_0 三軸試驗及配合水利局所取得之長期地下水位變化及沉陷量資料，判斷土壤之現地應力狀態，亦即處於正常壓密或過壓密狀態，再根據小變形之觀念，將土壤限定於線彈性範圍中，以有限差分解 Terzaghi 單向度壓密理論，並利用試誤法調整參數，求得適合現場沉陷資料的地質參數，且歸納出分析區域內之共同特性，使此分析模式適用於大範圍，而達到僅利用地下水位資料就可分析地層下陷行為與預估沉陷量之目的。

文中選取雲林地區進行沉陷行為的分析，並以蚊港現場的採樣做試驗，藉由室內試驗，包括 K_0 三軸透水試驗、壓密、直剪及一般物理試驗，對此 220 公尺深之鑽探土樣作分析，並藉由所求得地質參數，判斷程式模擬沉陷量時所使用參數之準確性。再由壓密求出之參數 C_v ，加入水位資料及土層厚度代入沉陷量估算程式，藉著調整不透水層厚度，即可得到沉陷量之模擬。

二、地盤下陷行為之逆算模擬概念

由於地下水位與沉陷量之間存在著某種關係，為瞭解此種關係，先由水位變化記錄與沉陷量來判斷土壤的行為，再將土層依現地結構作分層，其中將多層的可壓密黏土層以當量黏土層代替，並將當量黏土層分為 10 等份，另依過去最大應力的觀念，將水位變化資料簡化，再以有限差分解 Terzaghi 單向度壓密理論，求出當量黏土層中 U-H 圖中面積之改變量，亦即轉換成有效應力，由此有效應力改變量，依虎克定律求出單一時間內沉陷量。

再運用試誤法調整分析所使用之參數，使其於模擬其間之變化範圍與實際沉陷資料吻合，其所得之參數即認為是能代表現地地層材料之參數。欲將此地質參數使用於其它點時，僅需調整參數中之當量黏土層厚度即可。

逆算模擬中所採用之假設條件包括：

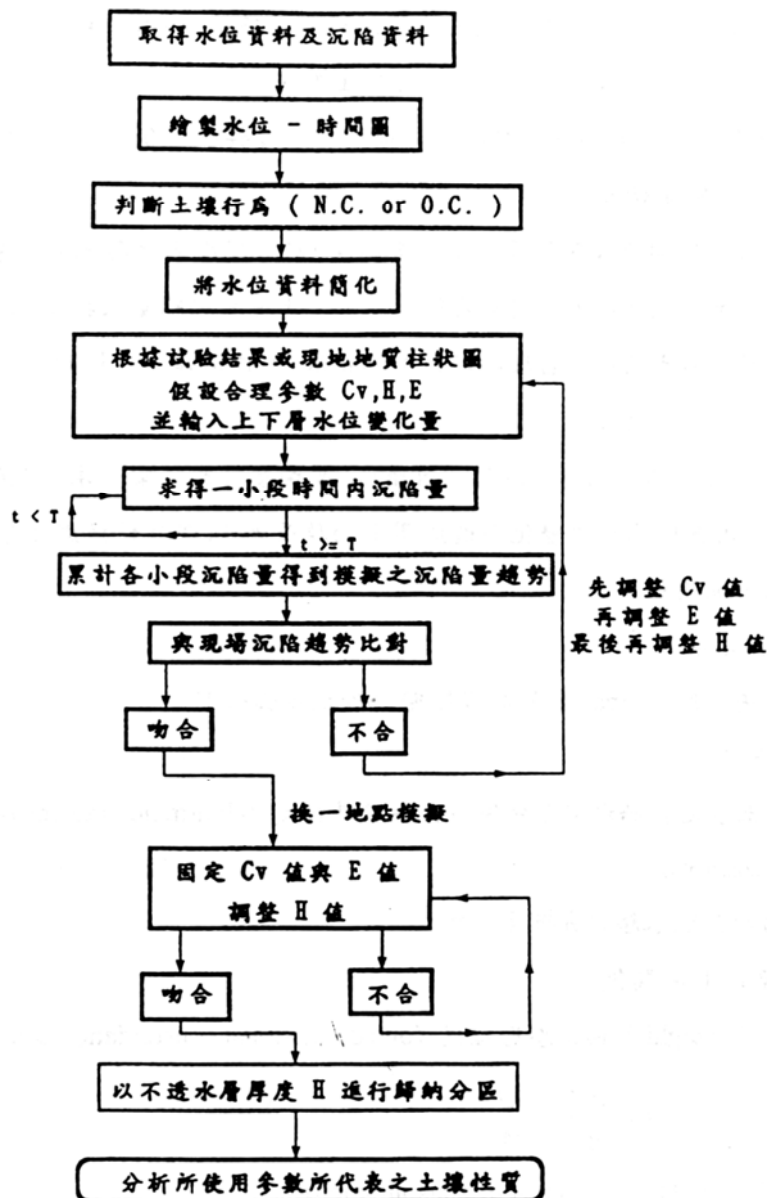
1. 土壤發生之沉陷行為均為線性
2. 沉陷之發生均由於孔隙水壓之消散所造成
3. 僅考慮土壤之垂直變形，土壤之側向無變形發生
4. 土壤顆粒與水不可壓縮
5. 土壤參數不隨深度而改變
6. 黏土層內部的初始水力梯度為常數
7. 黏土層的上下邊界點於時間一開始即達平衡時之水頭

8. 每一筆水位資料代表其當月的水壓力變化

9. 假設土層為水平層狀且均質

10. 透水層之砂土為理想化且等向者

逆算模擬之流程如圖 1 所示。而其沉陷量的估算如下：



t : 程式模擬沉陷量累計時間 T : 實際沉陷資料所花時間

圖 1 逆算模擬流程圖

1、透水層之沉陷量

一般透水層之性質由於立即沉陷量佔絕大部分，性質較接近彈性體，其沉陷量可以 $S = \Delta\sigma / E \times H$ 分析，透水層之沉陷量估算採虎克定律，並分別考慮 N.C. 與 O.C. 階段之沉陷量。

(1) 砂之沉陷量，在正常壓密由於土壤於線彈性範圍內，其應變量可由 $\Delta\varepsilon = \Delta\sigma / E$ 來計算，所以沉陷量 $S = H \times \Delta\varepsilon$ ，H：土層厚

(2) 在過壓密階段的砂，由於砂土於過壓密階段斜率 ≈ 0 ，所以沉陷量不予考慮。

2、黏土層之沉陷量估算

考慮正常壓密與過壓密階段黏土之沉陷量，於正常壓密之黏土其土層之沉陷量估算，因其在線彈性範圍內，故可以虎克定律來推算，土層之沉陷量大抵以此層為主。而過壓密黏土之沉陷量，由土壤的壓密理論以再壓縮指數 C_r 作估算，依 Holtz and Kovac (1984)，定義為 C_c 之 0.05-0.1 倍。

於黏土層之沉陷量估算，利用 Terzaghi 單向度壓密理論，求出孔隙水壓力 U 與深度 H 圖中，因孔隙水壓力變化而造成圖上面積改變量(即為轉換成之有效應力)，再利用虎克定律求出沉陷量。

3、數值模擬求解

以有限差分解 Terzaghi 單向度壓密理論之步驟如下：

(1) 初始水位

黏土層之初始水壓力分佈由於假設其梯度 (Hydraulic gradient) 為常數。

$$dh/dl = \text{constant} = i$$

所以初始孔隙水壓力分布呈線性

(2) 經過 t 時間後

由 Terzaghi 單向度壓密程式 (one dimensional consolidation equ.)

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\partial U}{\partial t}$$

C_v : 壓密係數 (coefficient of consolidation)

U : 孔隙水壓力

H : 黏土層厚度

T : 總時間

N : 排水層數目

Δz : 每一切割長度

則 $C_v \cdot (((U_{i+1,t} - U_{i,t}) / \Delta z - (U_{i,t} - U_{i-1,t}) / \Delta z)) / \Delta z$

$$= (U_{i,t+\Delta t} - U_{i,t}) / \Delta t$$

則 $C_v \cdot (U_{i+1,t} - 2 \cdot U_{i,t} + U_{i-1,t}) / (\Delta z)^2$

$$= (U_{i,t+\Delta t} - U_{i,t}) / \Delta t$$

所以 $U_{i,t+\Delta t}$

$$= U_{i,t} + 2 \cdot C_v \cdot \Delta t / (\Delta z)^2 \cdot ((U_{i+1,t} + U_{i-1,t}) / 2 - U_{i,t})$$

令 $r = 2 \cdot C_v \cdot \Delta t / (\Delta z)^2$

則 $U_{i,t+\Delta t} = U_{i,t} + r \cdot ((U_{i+1,t} + U_{i-1,t}) / 2 - U_{i,t})$

若 $r = 1$ 則 $U_{i,t+\Delta t} = 1/2 \cdot (U_{i-1,t} + U_{i+1,t})$

$$\Delta t = (\Delta z)^2 / (2 \cdot C_v) \quad - (1)$$

使 $r = 1$ 之證明

$$Tv \text{ (time factor)} = C_v \cdot T / (H/N)^2$$

又 $T = n \cdot \Delta t$ (n : 將時間分 n 小段, 每一小段 Δt 時)

$$\text{則 } Tv = C_v \cdot n \cdot \Delta t / (H/N)^2$$

若 $N = 2$ (雙向排水)

$$\text{則 } Tv = 4 \cdot C_v \cdot n \cdot \Delta t / H^2 \quad - (2)$$

又由 (1)

$$\begin{aligned} \Delta t &= (\Delta z)^2 / (2 \cdot C_v) \\ &= (H/10)^2 / (2 \cdot C_v) \\ &= H^2 / (200 \cdot C_v) \end{aligned}$$

代入 (2)

$$\begin{aligned} Tv &= 4 \cdot C_v / H^2 \cdot n \cdot H^2 / (200 \cdot C_v) \\ &= 1/50 \cdot n \end{aligned}$$

同理, 於單向排水中 ($N = 1$)

$$Tv = 1/200 \cdot n$$

4、邊界條件之處理

(1) 於處理第 1 點與第 11 點時

$$U(11)_t = 1/2 \cdot (U(10)_{t-\Delta t} + U(12)_{t-\Delta t})$$

$$U(1)_t = 1/2 \cdot (U(0)_{t-\Delta t} + U(2)_{t-\Delta t})$$

均係利用對稱(Symmetric)。

假設 $U(0)_t = U(2)_t$ $U(10)_t = U(12)_t$

如圖2所示

(2) 若土層為單向排水，則於底層之邊界

若 $U(11)_t > U(10)_t$

則使 $U(11)_{t+\Delta t} = U(10)_t$

(3) 若土層為雙向排水，且水位回升

計算結果為 $U(11)_{t+\Delta t} < U(11)_t$

但實際應 $U(11)_{t+\Delta t} \geq U(11)_t$

則使 $U(11)_{t+\Delta t} = U(11)_t$

(4) 若土層為雙向排水，且水位下降

計算結果為 $U(11)_{t+\Delta t} > U(11)_t$

但實際應 $U(11)_{t+\Delta t} \leq U(11)_t$

則使 $U(11)_{t+\Delta t} = U(11)_t$

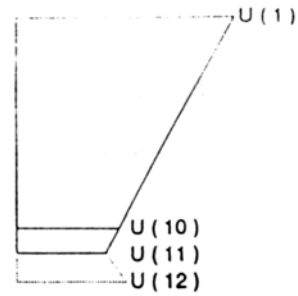


圖2 第10點與第12點節點對稱情形

三、逆算模擬方法

以下舉四湖為實例，說明使用程式估算沉陷量之方法，首先為土壤應力狀態，亦即分辨土壤是處於正常壓密或過壓密的階段。由所得沉陷量資料與水位資料研判，其沉陷量並無大起伏，當土壤進入正常壓密階段時，沉陷量應該會突然變大，所以判斷此地區在此模擬期間皆處於過壓密階段。

而水位資料之簡化，因地下水位的變化影響土壤的有效應力，為地盤下陷量最主要的因子，其影響依過去最大應力觀念取超過前期應力，應簡化具代表性的最低點連線，方得進行分析作業。依此原則選定如圖3-b即成簡化之水位資料。接著啟動程式，輸入所需參數共包括水位資料、E值、黏土層厚度H、Cv值、天數五項，開始進行前述流程圖中之試誤模擬。

輸入之參數中，水位根據臺灣省水利局(79.6)濁水溪平原地下水位及地盤下陷分層觀測研究中指出於雲林地區之上下水頭資料差大約為10公尺左右，故將初始水位各節點定為1~11公尺，且水位升降趨勢相同，故定上下水頭變化相同。而分析深度至100公尺則為根據上述研究中，土層之上下含水層約為40公尺和100公尺，所以將土層於模擬中

分三層，中間為當量黏土層，以下至 100 公尺間為砂土層。而又砂土層之沉陷量佔總沉陷亦不大，故分析至 100 公尺應不致有太大誤差。而 E 值則根據現場土樣選取一代表值，不透水層厚度則由試誤法推得。

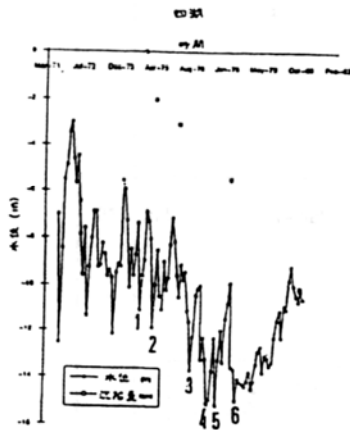


圖 3-a 四湖原來觀測之水位資料

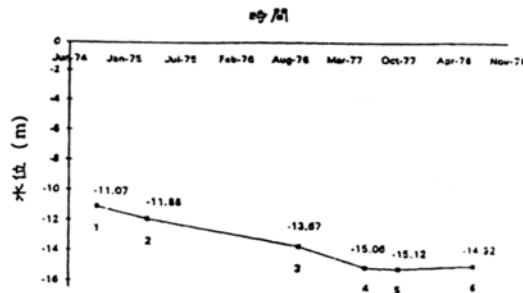


圖 3-b 四湖簡化後之水位資料

將所有求得之參數代入，如下：

1. 水位：1 ~ 11 公尺
2. E 值 (Young's modulus)：20 kg/cm² (clayey silt)
3. 不透水層厚度：14 公尺
4. 上層水頭變化為：1 - (11.88 - 11.07) = 0.19 公尺
5. 下層水頭變化為：10.19 公尺
6. $C_v = 0.2 \text{ m}^2 / \text{day}$
7. 時間 = 10/74 ~ 4/75：183 天

結果：

求得經 183 天之沉陷量 (1 → 2) = 0.68 公分，將各時期 (1 → 2、2 → 3、3 → 4、4 → 5、5 → 6)，沉陷量累加得如圖 4。

四、模擬結果之探討

依上述方法共模擬分析水利局過去在本地區觀測之 17 處資料，主要分佈在沿海地，其中有三處資料不足，無法完成，其餘分析結果推斷之當量黏土層厚度，如表一。

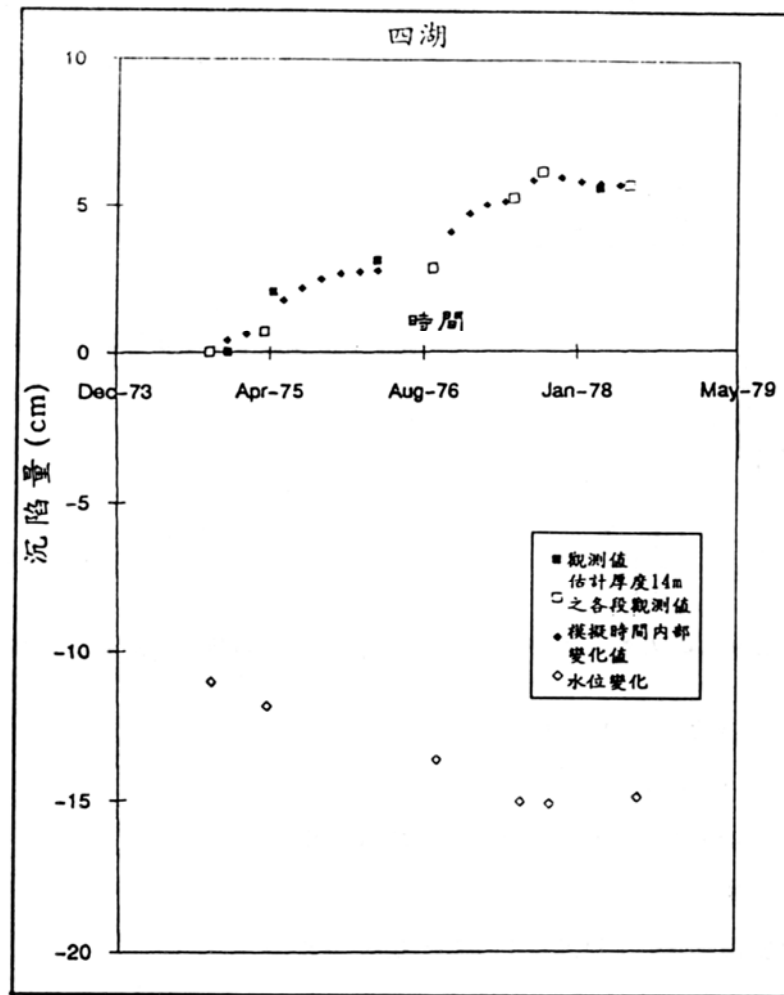


圖 4 四湖累積沉陷量圖

表一 雲林地區之當量黏土層厚度

站號	4	5	6	11	12	16	18	19	26	28	29	30	35	Bm7
站名	油車	豐榮	中山	山寮	蚊港	土庫	東勢	溪頂	箔子寮	水林	金湖	塭底	四湖	飛沙
黏土層當量厚度	12m	14m	11m	17m	12m	15m	16m	9m	13m	26m	19m	35m	14m	13m

由於模擬結果曲線並非規則，加上所得實際地層沉陷的量測資料非常少，故趨勢之吻合與否無法以一般迴歸方法來判斷其相關性。所以於此分析之第一點與最末點作比較，利用調整當量黏土層厚度使誤差為最小。將此結果與台灣省水利局〔濁水溪平原地下水域

水文地質之分析研究] 所作濁水溪平原黏土層地質分佈圖作比較，可以發現，其相對趨勢是符合。統計作成試表二，從疊合的圖形上亦可見上述之結果，如圖 5。而於全部地點之模擬結果，其中間各點之誤差大致上均相差不大，故其所使用之參數應是可接受的，且使用第一點與最末點之誤差來調整當量黏土層厚度之方法是可行的。

表二 模擬與實際結果對照圖

黏土層厚度	當量黏土層厚度	建議使用當量黏土層厚
25-50m	9-13m	12m
50-100m	14-17m	15m
100 m 以上	18m 以上	25m

蚊港現場沉陷量之預測：由蚊港現場根據 K_0 三軸試驗結果、沉陷資料與水位資料三者研判，此地區位於正常壓密階段。利用前面所求出之適用於雲林地區之地質參數，預測蚊港村之地層下陷量，嘗試調整 C_v 與 E 質，由計算結果可見其造成的影響(圖 6)，結果得以 $C_v=0.2 \text{ m}^2/\text{day}$ 較佳，接近黏土質沉泥，符合鑽探結果。

分析期間，於蚊港村地下水位已超過過去最低水位，現應處於正常壓密階段，若水位持續下降，其土壤之沉陷行為處於正常壓密階段，水位每下降 1m，其砂土層會發生 1.72cm 的沉陷，當量黏土層內有 16.1cm 的沉陷。

五、結論與建議

1. 結論:

經本文之研究探討後，得到以下結論：

- (1)根據三軸 K_0 透水試驗結果，其 K_0 值均介於 0.3 ~ 0.5，故推斷於蚊港現場仍於正常壓密階段 (N.C.)，結果與水位資料印證相符合，故應控制本地區之地下水抽取量，否則地下水位每下降 1 公尺，將造成地表約 18 公分的沉陷量。
- (2)由線彈性程式分析雲林沉陷量結果，現地地質圖研判之黏土層以 "黏土質沉泥"來估算可得較好之結果，此與蚊港現場之鑽探報告吻合。
- (3)由程式試誤之結果得出於雲林地區將土層分三層， $C_v = 0.2 \text{ m}^2/\text{day}$ 、 $E_s = 500 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_c = 20 \text{ kg/cm}^2$ 、 H 依建議厚度使用，再配合水利局水位資料，即可利用水位資料分析及預估沉陷量。

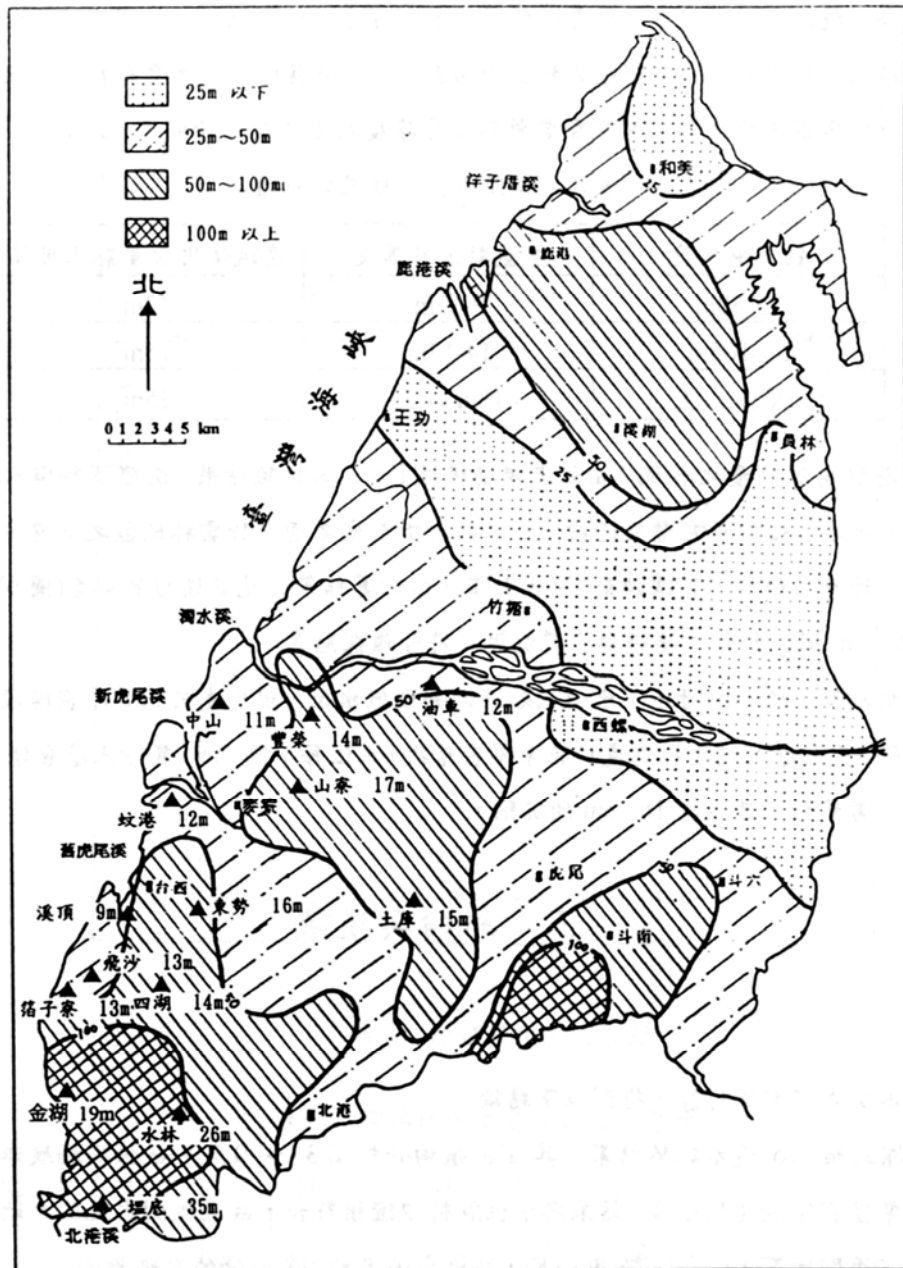


圖 5 濁水溪平原黏土質地層厚度與當量厚度疊合圖

(4)由於本分析地層下陷行為模式僅考慮到線彈性範圍，故僅將土層分為 "砂土" 和 "黏土質沉泥" 二種材料，並無考慮其 C_c (壓縮指數)、 e_0 (初始孔隙比) 等因素，所以估算結果並無法完全推得精確之沉陷量，而是希望推行此簡化模式，所得誤差大約在 15 % 以內。

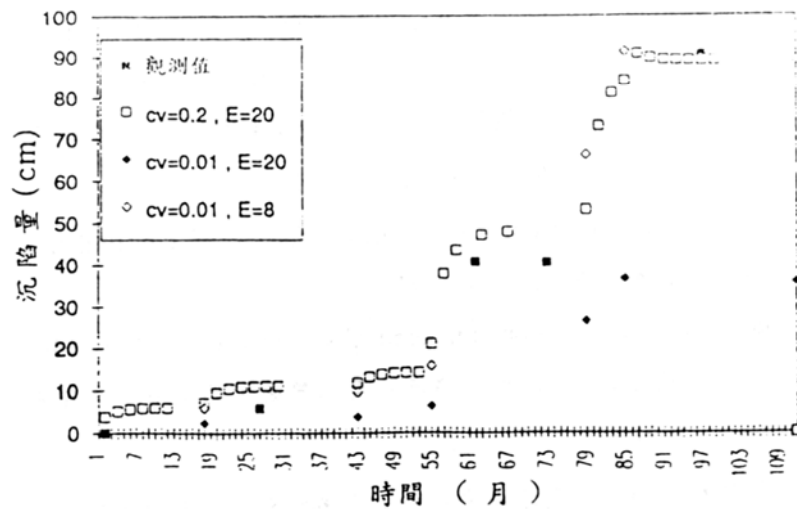


圖 6 蚊港地區調整參數與現場之沉陷趨勢比較圖

(5)於分析過程中，主要引進過去最大有效應力的觀念來簡化地下水的變化，並非任何地點均可適用，當水位資料不足，且過去最低水位不在分析期間時，本分析模式則無法使用。

2.建議：

因全省所使用之自計式水位與沉陷井只 13 口，且分散於各地，故於分析單一縣市時，僅能使用之沉陷資料太少（約 1 ~ 2 年一筆）與每月測一次的水位資料記錄，是否具有代表性？而使分析工作無法突破，若能增加自記式水位及沉陷井，則可使資料更接近現地情況，使於分析地層下陷行為方面更進一步，且更據可靠性。

六、參考文獻

1. 曹以松，「地下水」，中國土木水利工程學會 4 - 156p，民國 78 年 10 月
2. 簡俊彥、蔡俊男等，地盤下陷研討會 (III) 217p，民國 79 年 6 月
3. Terzaghi, Karl, "Settlement and Consolidation of Clay", Eng. News - Rec., McGraw - Hill, New York, 874p - 878p, Nov. 26, 1925
4. 吳建民，「臺北盆地地盤下陷之回顧」，地工技術雜誌 第 20 期. 34p - 49p，民國 76 年 10 月
5. Biot, M.A., "Generation Theory of Three Dimensional Consolidation", Journal of applied

- physics, Vol.12, 155p - 164p, 1941
6. Gambolati G and Freeze R.A., "Mathematical Simulation of Subsidence of Venies". Water Resources Research, Vol.9, No. 3, 721p - 733p, 1973.6.
 7. 譚建國、呂志宗, 「飽和土層因抽水所引致的壓密沉陷解析」, 中國土木水水利工程學刊, 第二卷第二期, 159p - 167p, 1990.
 8. Smith I.M. and Hobbs R., "Biot analysis of consolidation beneath embankment", Geotechnique, 26, No.1. 149p - 171p, 1976.
 9. Harr M.E., "Foundation of theoretical soil mechanics. 132p-144p", 1966
 10. 林明煌、柳志錫, "地盤下陷行為與水質鹽化的調查及地陷防治效應之研究", 97p - 109p, 1991
 11. 台灣省水利局, 「濁水溪平原地下水域水文地質之分析研究」, No.34, 民國 78 年四月
 12. 蘇苗彬, 「臺灣西南沿岸之地盤下陷機制探討」, 地質防災技術研討會, 43p - 80p, 1991
 13. 施清吉、周志芳, 「地下水抽取引起地盤下陷之研究」, 碩士論文, 淡江大學土木工程研究所, 民國 73 年 6 月
 14. 經濟部中央地質調查所, 「臺灣地區地下水觀測網第一期綱要計劃」, 12p, 民國 81 年 12 月
 15. 楊清源, 「三軸 Ko 壓密試驗自動化之研究」, 中興大學土木工程研究所碩士論文, 民國 78 年 6 月
 16. Mayne P.W. and Kulhawy F.H., "Ko - OCR Relationships in Soil.", Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceeding of ASCE. 851p, 1982
 17. Donald C.Helm, One - Dimensional Simulation of Aquifer System, Compaction Near Pixley, California, Water Resources Research, Vol.11., No.3, 465p - 478p, 1975
 18. 李華寧、蘇苗彬, 「促進雲林沿海地區農地有效利用之研究」, 57p, 雲林縣政府, 民國 81 年 7 月

本文承蒙國科會計畫(編號 NSC86-2621-P-005-018)經費之補助, 僅此誌表謝意。

Study on the Land Subsidence Behavior Using Reverse Calculation and Prediction

Miau-Bin Su

Associate Professor, Department of Civil Engineering
National Chung Hsing University

Yuh-Jyh Chen

Master, Department of Civil Engineering
National Chung Hsing University

Kao-Ming Yang

Master, Department of Civil Engineering
National Chung Hsing University

ABSTRACT

Study of ground subsidence problem in Taiwan started from Taipei basin. Recently, the problem was diminished because of tap water supply increase.. But over pumping of groundwater in west-south coast of Taiwan causes the problems of land subsidence, especially on the plain of Cho-Shui Stream. As its particular geological structure, the problem of the land subsidence is very serious. So it's important to predict settlement and prevent the land from getting sinking.

The study proposed is using k_0 triaxial test, groundwater table data and settlement data to judge whether the soil behavior is in normal consolidation or in over consolidation stage. According to the concept of small deformation, the soil property is confined in the linearly elastic scope. And using Finite difference method to solve Terzaghi one dimensional consolidation, and the geological parameter is adjusted by try and error method. Then we can induct the common characteristics of the study zone to make this model fit other area. Then we can analyze the land subsidence behavior and predict settlement using the data of groundwater table alone.

Yun-Lin area is chosen to analyze the subsidence behavior, and take Wen-Kang for example, to prove whether the parameter we choose is good enough to represent the geological situation. At the end, we find that the testing result matches well with the result of core examination in Wen-Kang.