

地下水位歷線與沉陷檢測資料之應用

Application of Groundwater Hydrographs and Detected Data of Land Subsidence

淡江大學水資源及環境工程學系教授

淡江大學水資源及環境工程學系研究生

施 清 吉*

Ching-Chi Shih

陳 致 宏

Chih-Hung Chen

摘 要

本研究主要利用地下水位歷線與沉陷檢測資料，配合水井普查統計資料及土層材質與組織結構等相關資料，用以推求壓縮指標 C_c 以及滲透係數 K 。研究範圍僅侷限於受壓飽和含水層，此層之土壤組織大多以砂和礫石為主。藉由構建地層下陷近似模式之解析解，進一步以 $Q = -A_{soil} \frac{\partial h}{\partial t}$ 取代抽水量難以估算的瓶頸， $\frac{\partial h}{\partial t}$ 為地下水位變率，受壓飽和含水層水平面積 A_{soil} 之估算採用徐昇氏多邊形法。推求壓縮指標 C_c 以及滲透係數 K 的範例，應用在屏東及雲嘉地區等 16 個觀測站。壓縮指標 C_c 之計算結果顯示，「細砂」約略分佈在 0.064~0.1；「粗砂」在 0.034~0.064 的範圍內；「礫石」則在 0.034 以下。 K 之計算結果，大致符合實驗室透水試驗各土層材質的試驗數據。藉由分析比較 C_c 及 K 的變異數 σ^2 ，判斷此二係數的離散程度。並考慮地下水位歷線相關因子 (h_{rve} 、 Δh_{max} 、 $\frac{\partial h}{\partial t}$) 以及沉陷檢測資料 H' 對於 C_c 及 K 之影響分析。

關鍵詞：地下水位歷線，壓縮指標，滲透係數，受壓飽和含水層，地層下陷。

ABSTRACT

The object of this study is to investigate the Compression index C_c and the Permeability K in groundwater. The analysis is based on the information of the groundwater hydrographs, detected data of land subsidence, groundwater well investigation and the related data of land soil. The current project is restricted to confined saturated aquifer and the composition of this layer is mostly sand and gravel. The estimation of C_c and K is based on the analytical solution of the approximate model of

*通訊作者，淡江大學水資源及環境工程學系教授，251 台北縣淡水鎮英專路 151 號，006956@mail.tku.edu.tw

land subsidence. However, $Q = -A_{soil} \frac{\partial h}{\partial t}$ is used to solve the difficulty in estimating the pumping discharge, the groundwater level rate is computed by $\frac{\partial h}{\partial t}$, and the horizontal surface area of confined saturated aquifer A_{soil} is estimated by the Thiessen polygons method. The estimations of Compression index C_c and the Permeability K are applied to 16 sites in Pingtung, Yunlin and Chia-yi regions. The results of these sites show that the value of C_c is 0.064 ~ 0.1 for the fine sand, 0.034 ~ 0.064 for the coarse sand, and below 0.034 for the gravel. However, the computed value of K is almost the same with the experimental result of Permeability test. The diversity of C_c and K can be determined by analyzing their variance (σ^2). The impact analysis on C_c and K also take into consideration in this study, especially with the correlate factors of groundwater hydrographs (h_{ave} , Δh_{max} , $\frac{\partial h}{\partial t}$) and detected data of land subsidence (H').

Keywords: Groundwater hydrographs, Compression index, Permeability, Confined saturated aquifer, Land subsidence.

一、前言

「地下水位歷線」與「沉陷檢測資料」在諸多領域皆有其運用之價值與重要性。此二資料的獲得，係透過觀測井長期觀察與詳細記錄，其設置目的為用於監測地層下陷與地下水位變化，而地層下陷之主因係來自於受壓飽和含水層 (Confined saturated aquifer) 之超抽地下水，只有受壓飽和含水層才能提供穩定且豐富的地下水。因此本文僅針對受壓飽和含水層，利用地下水位歷線與沉陷檢測資料來推估壓縮指標 C_c 與滲透係數 K 。

二、理論分析

在簡單理想的情況之下，配合達西定律、有效應力及壓密試驗理論的應用，藉由抽水井自受壓飽和含水層抽取地下水，導致地層下陷的偏微分方程式如下所示(施，1976)。

$$\frac{\partial H'}{\partial t} = D \nabla^2 H' + w_p' \dots\dots\dots(1)$$

式中， H' 為沉陷量， t 為時間， ∇^2 代表拉普拉斯運算子(Laplace Operator)， w_p' 表抽水項。座標軸採用極座標，抽水井截面積為 $A(= \pi R^2)$ ， R 為

抽水井半徑；當抽水量為 Q 時，流經抽水井之斷面平均速度為 $w_p (= \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi R^2})$ ；於抽水管內， $w_p' = w_p N$ ，於抽水管外， $w_p' = 0$ ； N 與 D 分別定義為抽水係數(Pumping coefficient)與擴散係數(Diffusivity coefficient)，

$$D = \frac{K}{\gamma n(\alpha + \beta n)} \Big|_{t=0} \dots\dots\dots(2)$$

$$N = \frac{C_c}{pn(1+e)(\alpha + \beta n)} \Big|_{t=0} \dots\dots\dots(3)$$

其中， K 、 α 、 n 、 p 、 C_c 、 e 分別為土壤的滲透係數(Permeability)、顆粒骨架(Granular skeleton)之垂直壓縮係數、孔隙率(porosity)、孔隙壓(Pore water pressure)、壓縮指標(Compression index)與孔隙比(Void ratio)； γ 與 β 分別為水的單位體積重與壓縮係數；而" $t=0$ "則代表該係數值以抽水前之初始值計。考慮式(1)，該式為二維擴散方程式(Two-dimensional diffusion equation)形式： $\frac{\partial H'}{\partial t} = D \nabla^2 H'$ 加上抽水項 w_p' 所組成。為了構建其解，考慮一類似簡單情況，簡化原二維擴散方程式為一維，且不含抽水項 w_p' ，即

$\frac{\partial(H_{inst}')}{\partial t} = D \frac{\partial^2(H_{inst}')}{\partial x^2}$ ，若條件為來自於 $\delta(x)$ (Dirac delta function) 給予單位衝擊負荷，則此偏微分方程式的解為 (Farlow, S. J., 1982)

$$H_{inst}'(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[\frac{-x^2}{4Dt}\right] \dots\dots\dots(4)$$

以式(4)做為式(1)之格林函數 (Green function)。式(4)俗稱為瞬時點源 (Instantaneous point source)，本文即以瞬時點源 $H_{inst}'(x,t)$ 做為格林函數。另外，本文為二維，依照 (Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger, 1959) 的公式推導，可以格林函數搭配其他函數 [$f(x,y)$ 以及 $\phi(x,y,t)$] 來構建式(1)的解，其中， $f(x,y)$ 為初始條件 (Initial condition)、 $\phi(x,y,t)$ 為邊界條件 (Boundary condition)。結合本文情形，由於未抽水之前，並無沉陷量產生，因此 $f(x,y) = 0$ ；再者，抽水之後，無窮遠處的沉陷量為零，因而 $\phi(x,y,t) = 0$ 。則式(1)之「解」為 (Amossow, 1937；施，1998)

$$H' = \frac{QN}{\pi D} \int_0^\infty J_0(\lambda\xi) J_1(\lambda) \left[\frac{1}{\lambda^2} (1 - e^{-\tau\lambda^2}) \right] d\lambda \dots\dots\dots(5)$$

式中

$$\xi = \frac{r}{R} \quad (\text{無因次空間座標}) \dots\dots\dots(6)$$

$$\tau = \frac{Dt}{R^2} \quad (\text{無因次時間}) \dots\dots\dots(7)$$

其中， J_0 與 J_1 分別為第一類零階、一階貝塞函數 (Bessel function)， r 為極座標半徑。式(5)即為抽取地下水而導致地層下陷之近似模式，主要目的在於反求擴散係數 D ，以及包含在擴散係數定義裡的滲透係數 K 。實際應用上，無因次空間座標 ξ 與無因次時間 τ 均須為已知，且必須先克服兩項因子，即抽水量 Q 以及抽水係數 N 的推估。

本研究假想一個涵蓋整個受壓飽和含水層的偌大範圍，這範圍中，包含地下水的抽取與補注，即使地下水的天然補注，無法即時彌補自受壓飽和含水層的超抽地下水量，然而終將反映在地下水位的變化。因此，地下水位變化與抽水量

Q 之間的質量守恆，可以下式表示之

$$Q = -A_{soil} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots(8)$$

式中， A_{soil} 為受壓飽和含水層水平面積， h 為地下水位。假設 A_{soil} 在沉陷過程中保持定值，則其值的推求，僅須利用某一年度的(地下水位與抽水量)實測資料，配合式(8)的運用即可獲得。當 A_{soil} 獲得之後，配合地下水位資料求得地下水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 值後，往後其他年度的抽水量推估值即可由該年度的地下水位變率直接計算而得。

抽水係數 N 值，係根據土層組織與結構等相關資料，由式(3)的定義直接估算而得。式(3)中的係數與因子包括土壤壓縮指標 C_c 、孔隙壓 p 、孔隙率 n 、孔隙比 e 以及 $(\alpha + \beta n)$ 。

關於壓縮指標 C_c 的估算，可引用土壤力學公式求得，即 (Sowers, G. B. and Sowers, G. F., 1970)

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_o' + \Delta\sigma'}{\sigma_o'}\right)} \dots\dots\dots(9)$$

式中， Δe 為孔隙比增量， σ_o' 為初始有效應力 (Initial stress)， $\Delta\sigma'$ 為有效應力增量。其中，孔隙比增量 Δe 可透過軸向應變增量 $\Delta\varepsilon$ 求得，即 $\Delta e = \Delta\varepsilon(1 + e_o)$ ， e_o 為初始孔隙比；而軸向應變增量 $\Delta\varepsilon$ 又可藉由楊氏係數 (Young's Modulus) E 求得，即 $\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma'}{E}$ 。由於本文只考慮垂直方向

的沉陷機制，故楊氏係數 E 可以軸向(一維)土壤顆粒骨架之垂直壓縮係數 α 之倒數表示之，由表 1 (江，2000) 土層材質之垂直壓縮係數 α 值，可以轉換成表 2，土層材質之楊氏係數 E 值。另，根據 Terzaghi 定理， $\sigma = \sigma' + p$ ， σ 為總應力，其值等於飽和顆粒之單位體積重 γ_{sat} 乘以井深 w_d 。 γ_{sat} 又可以 $\frac{\gamma_s + e \times \gamma}{1 + e}$ 表示，其中 γ_s 為土壤之單位體積重， γ 為水的單位體積重， e 則表孔隙比。井深零點設於地表，向下起算。地下水位高度為 h ，零點也設於地表，向上起算，故

表 1 土壤材質之垂直壓縮係數 α 值
(Kèzdi, 1974; Domenico and Schwartz, 1990)
單位: $(\times 10^{-9} \frac{1}{pa})$

| 岩性 | 排列密度 | | |
|-----|--------------------------------------|-----------|-----------|
| | 疏鬆 | 中度 | 緊密 |
| 砂質礫 | 33.3~12.5 | 12.5~10.0 | 10.0~5.0 |
| 砂 | 100~33.3 | 33.3~20.0 | 20.0~12.5 |
| 粉砂 | 125~83.3 | 83.3~50.0 | 50.0~33.3 |
| 備註 | 破裂硬岩(Hard fissured rock)約: 0.69~0.33 | | |

資料來源: 參考文獻(9)。

表 2 土層材質之楊氏係數 E 值
單位: $(\times 10^6 pa)$

| 岩性 | 排列密度 | | |
|-----|--------------------------------------|--------|---------|
| | 疏鬆 | 中度 | 緊密 |
| 砂質礫 | 30~80 | 80~100 | 100~200 |
| 砂 | 10~30 | 30~50 | 50~80 |
| 粉砂 | 8~12 | 12~20 | 20~30 |
| 備註 | 破裂硬岩(Hard fissured rock)約: 1449~3030 | | |

註: 由表 1, 經 $E = \frac{1}{\alpha}$ 轉換所得之值。

表 3 土壤材質之初始孔隙比 e_0 值及單位體積重 γ_s 值

| 岩性 | e_0 | | $\gamma_s (lb/ft^3)$ | | $\gamma_s (N/m^3)$ | |
|-------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | $e_{0,max}$ (2) | $e_{0,min}$ (3) | $\gamma_{s,min}$ (4) | $\gamma_{s,max}$ (5) | $\gamma_{s,min}$ (6) | $\gamma_{s,max}$ (7) |
| 乾淨均勻砂 | 1.00 | 0.40 | 83 | 118 | 13047.6 | 18549.6 |
| 淤砂 | 0.90 | 0.30 | 87 | 127 | 13676.4 | 19964.4 |
| 細~粗砂 | 0.95 | 0.20 | 85 | 138 | 13362.0 | 21693.6 |
| 礫石 | 0.85 | 0.14 | 89 | 146 | 13990.8 | 22951.2 |

註 1: $1(lb/ft^3) = 157.2(N/m^3)$ 。

註 2: 欄(1)~(5)為參考文獻(5)原始資料; 欄(6)、(7)分別為欄(4)、(5)經單位換算而得。

表 4 水的單位體積重 γ 和壓縮係數 β 與溫度之關係值 (Langguth and Voigt, 1980)

| 溫度(°C) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\gamma(N/m^3)$ | 9798 | 9797 | 9782 | 9757 | 9724 | 9683 | 9635 | 9582 | 9524 | 9460 | 9392 |
| $\beta(\times 10^{-10} m^2/N)$ | 5.10 | 4.79 | 4.59 | 4.48 | 4.42 | 4.42 | 4.45 | 4.52 | 4.61 | 4.73 | 4.89 |

資料來源: 參考文獻(9)。

孔隙壓 p 等於 $(h+W_d) \times \gamma$ 。由上式得知 $\sigma' = \sigma - p = \frac{\gamma_s + e \times \gamma}{1 + e} W_d - (h + W_d) \gamma$, 最後以地下水水位年平均高度 h_{ave} 取代瞬時地下水水位高度 h , 以利分析。其中, 地下水水位年平均高度 h_{ave} 、井深 w_d 可分別由(地下水水位歷線、年抽水資料統計值)估算而得。民國六十九年一月台灣省屏東農田水利會出版「屏東縣林邊溫豐地區地盤下陷調查研究地下水井普查魚灌灌溉面積調查工作報告」。此水井普查詳列多項統計資料, 不同口徑抽水井的井數、井深、抽水時間、抽水量等等, 抽水量並不易實測求得。利用這些統計資料可求

得各沉陷地區抽水井口徑、井深、抽水時間、抽水量等四項的代表量或期望值(台灣省屏東農田水利會, 1980)。土壤之單位體積重 γ_s 與水的單位體積重 γ 都須由相關表適當估算而得, 分別可採用表 3 [Lambe, T. W. and Whitman, R. V., 1969(A)]與表 4 (江, 2000)。至於有效應力增量 $\Delta \sigma'$, 由於其值反映於地下水水位歷線, 本文探討的重點在於受壓過程而非減壓, 所以只能利用地下水水位歷線圖(Hydrograph)的下降段。於此, 本文將利用水的單位體積重 γ 與地下水水位歷線圖之累積下降段 Δh_{max} 之乘積, 估算有效應力增量, 即 $\Delta \sigma' = \gamma \times \Delta h_{max}$ 。由以上所述, 則可求得

壓縮指標 C_c 值。至於孔隙壓 p ，則以 $p = (h_{ave} + w_d) \times \gamma$ 估算。孔隙比 e 以初始孔隙比 e_o 計，且 e_o 為已知，由表 3，第二、三欄適當估算而得。再者，孔隙率 n 與孔隙比 e 之間的關係為 $n = \frac{e}{1+e}$ ，因此孔隙率 n 可由已知的孔隙比 e 來推求。最後考慮 $(\alpha + \beta n)$ 值的推估，土壤顆粒骨架之垂直壓縮係數 α 值可由表 1 獲得；而水的壓縮係數 β 值，則藉由表 4 估算而得，因此 $(\alpha + \beta n)$ 值即為所求。由以上相關土壤力學係數與因子的推估，配合地下水位歷線的應用，代入式(3)抽水係數 N 的定義，可直接獲得抽水係數 N 值。

將式(8)代入式(5)，即可得

$$H' = \frac{N}{\pi D} \left(-A_{soil} \frac{\partial h}{\partial t} \right) \int_0^\infty J_0(\lambda \xi) J_1(\lambda) \left[\frac{1}{\lambda^2} (1 - e^{-\tau \lambda^2}) \right] d\lambda \dots\dots\dots(10)$$

式(10)即為本文所提之地層下陷進階近似模式，此處所謂「進階」的意義在於：利用受壓飽和含水層水平面積 A_{soil} 以及地下水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ ，取代抽水量 Q 難以推估的瓶頸。在獲得受壓飽和含水層水平面積 A_{soil} 計算值、地下水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 值之後，(即相當於獲得抽水量 Q 的推估值)，並搭配抽水係數 N 的估算值，即可利用式(10)反求而得擴散係數 D 值，並可進一步藉由式(2)擴散係數 D 的定義求得滲透係數 K 值。式中為了掌握擴散係數 D 以及抽水係數 N 這兩個控制參數皆為正值，故地下水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ ，必須以地下水位歷線圖之下降段計，亦即 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 之值為負。

三、範例應用

本文範例應用的沉陷區域，選取屏東地區(林邊、佳冬、塹豐、水底寮、枋寮)以及雲嘉地區(中山、蚊港、溪頂、廣溝、四湖、金湖、大溝村、水林、塹底、東石、新塹)共計 16 個觀測站做為代表。該區的實測資料計有：歷年地下水位觀測資料、歷年沉陷檢測資料、各鄉鎮水井普

查統計資料。其中，屏東地區相關檢測資料來自於(陳，2001)所蒐集民國 71 年~89 年的資料；雲嘉地區則來自於(李，2000)所蒐集民國 70 年~87 年的資料，做為計算之依據。

3.1 推求壓縮指標 C_c 與抽水係數 N

以屏東林邊地下水位觀測井之民國 82 年觀測數據為例(陳，2001)，且配合土層材質與組織結構之相關資料，首先由式(9)推求壓縮指標 C_c 值，而後再利用式(3)抽水係數的定義，又可得 N 值。

$$E = 3.0 \times 10^7 \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

$$e = e_o = 0.80$$

$$\gamma_s = 14622 \left(\frac{N}{m^3} \right)$$

$$\gamma = 9790 \left(\frac{N}{m^3} \right)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e \times \gamma}{1 + e} = \frac{14622 + 0.8 \times 9790}{1 + 0.8} = 12474 \left(\frac{N}{m^3} \right)$$

$$w_d = 43 \text{ (m)} \quad \text{(陳，2001)}$$

$$h_{ave} = -11.3147 \text{ (m)} \quad \text{(陳，2001)}$$

$$\Delta h_{max} = 5.05 \text{ (m)} \quad \text{(陳，2001)}$$

$$\begin{aligned} \sigma_o' &= \sigma - p \\ &= \gamma_{sat} \times w_d - (h_{ave} + w_d) \times \gamma \\ &= 12474 \times 43 - (-11.3147 + 43) \times 9790 \\ &= 2.2618 \times 10^5 \left(\frac{N}{m^2} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta \sigma' = \gamma \times \Delta h_{max} = 9790 \times 5.05 = 4.9440 \times 10^4 \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \sigma'}{E} = \frac{-4.9440 \times 10^4}{3.0 \times 10^7} = -1.6480 \times 10^{-3}$$

($\Delta \sigma'$ 前負號表壓縮)

$$\begin{aligned}\Delta e &= \Delta \varepsilon(1 + e_o) = -1.6480 \times 10^{-3} \times (1 + 0.80) \\ &= -2.9664 \times 10^{-3} \\ C_c &= \frac{-\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_o' + \Delta \sigma'}{\sigma_o'}\right)} \\ &= \frac{-(-2.9664 \times 10^{-3})}{\log\left(\frac{2.2618 \times 10^5 + 4.9440 \times 10^4}{2.2618 \times 10^5}\right)} = 0.0346\end{aligned}$$

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{0.80}{1 + 0.80} = 0.4444$$

$$\alpha = 3.3333 \times 10^{-8} \left(\frac{m^2}{N}\right)$$

$$\begin{aligned}\alpha + \beta n &= 3.3333 \times 10^{-8} + 4.69 \times 10^{-10} \times 0.4444 \\ &= 3.3541 \times 10^{-8} \left(\frac{m^2}{N}\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p &= (h_{ave} + w_d) \times \gamma = [-11.3147 + 43] \times 9790 \\ &= 3.1020 \times 10^5 \left(\frac{N}{m^2}\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N &= \frac{C_c}{pn(1 + e)(\alpha + \beta n)} \\ &= \frac{0.0346}{3.1020 \times 10^5 \times 0.4444 \times (1 + 0.80) \times 3.3541 \times 10^{-8}} \\ &= 4.1573\end{aligned}$$

由上述可知，藉由地下水位歷線、水井普查統計資料以及土層材質與組織結構之相關資料，方可推求壓縮指標 C_c 以及抽水係數 N 。

3.2 推求擴散係數 D 與滲透係數 K

由式(10)，欲求 D ，必須先設法推求地下水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 、受壓飽和含水層水平面積 A_{soil} 。地下水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ ，採用年度地下水位下降段之月份，予以加總合計，以屏東林邊民國 82 年為例，其地下水位下降段為 1~5 月，6~7 月，以及 8~9 月，如圖 1 所示。三階段下降值相加，即為該年

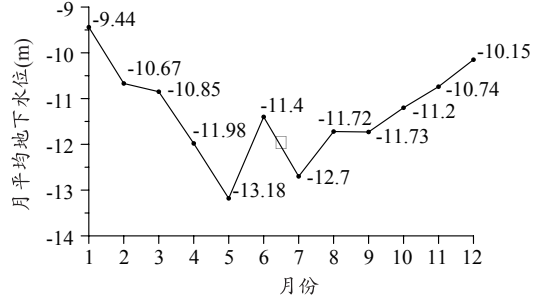


圖 1 屏東地區林邊民國八十二年月平均地下水位歷線圖



圖 2 屏東地區林邊、佳冬、枋寮控制面積劃分圖

度總地下水位下降值，計算如下所示。

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{[-13.18 - (-9.44)] + [-12.7 - (-11.4)] + [-11.73 - (-11.72)]}{1} \\ &= -5.05 \left(\frac{m}{year}\right) \\ &= -1.6013 \times 10^{-7} \left(\frac{m}{s}\right)\end{aligned}$$

假設各觀測點之 A_{soil} 比，相當於各觀測點之間地面面積比；採用徐昇氏多邊形法(Thiessen polygons method)在地圖上劃分各觀測點之地面控制面積，如圖 2 所示；利用求積儀求得各區之地面面積比，即 A_{soil} 比。為了便於分析，本文假設 A_{soil} 值為一定值與年度無關。年抽水量 Q 的取得來自水井普查資料。水井普查提供了多項調查之統計資料。絕大部分係以井徑為依據而詳列其

下的調查結果，計有井數、井深、抽水時間與抽水量。其中抽水量的調查結果最具爭議性。本文係根據這些水井普查資料，間接地求得沉降地區抽水量的代表量，並不是官方資料。利用本研究範圍內已知總抽水量，配合各區某一年度的地下水水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ ，即可獲得各區之 A_{soil} 值。例

如：屏東地區五個觀測站的年總抽水量、 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 、地面面積比為均已知。利用上述資料，並以屏東林邊為例計算說明如下。

$$\text{年總抽水量} = 243477189 \left(\frac{m^3}{\text{year}} \right) \quad (\text{陳, 2001})$$

$$\begin{aligned} \Sigma(\text{地面面積比} \times \frac{\partial h}{\partial t}) &= 0.2177 \times (-4.92) \\ &+ 0.3777 \times (-12.73) + 0.0608 \times (-0.11) \\ &+ 0.0979 \times (-17.3) + 0.2459 \times (-10.41) \\ &= -10.1394 \left(\frac{m}{\text{year}} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\text{年總抽水量}}{\left| \Sigma(\text{地面面積比} \times \frac{\partial h}{\partial t}) \right|} = \frac{243477189}{|-10.1394|}$$

$$= 24012977.99(m^2)$$

$$\begin{aligned} \text{林邊之 } A_{soil} &= 24012977.99 \times 0.2177 \\ &= 5227625.308(m^2) \end{aligned}$$

獲得 N 、 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 、 A_{soil} 等值之後，配合水井普查估算而得的抽水時間 t 、抽水井半徑 R ，以及沉降資料 H' ；並將無因次空間座標 ξ 值統一設為 1，即沉降量 H' 發生在抽水井之管徑 R 處。年沉降量往往只不過幾公分而已，其值並不明顯，應採用沉降量顯著之處予以探討較為適當。但因 $\xi < 1$ 代表在抽水管內，故本文以抽水井之管徑 R 處為著眼點。由上述已知條件，就可由式(10)，採用二分法(Bisection)反求擴散係數 D 。獲得 D 值後，由 D 的定義，則可得滲透係數 K 值。同樣是以屏東林邊民國 82 年數據為例計算予以說明。

$$D = \frac{K}{\gamma n(\alpha + \beta n)}$$

$$\Rightarrow 46.9682 = \frac{K}{9790 \times 0.4444 \times 3.3541 \times 10^{-8}}$$

$$\Rightarrow K = 6.8539 \times 10^{-3} \left(\frac{m}{s} \right)$$

由前述可知，欲由式(10)反求擴散係數 D 及滲透係數 K ，除了需地下水水位歷線、水井普查統計資料以及土層材質與組織結構之相關資料以外，尚須具備沉降檢測資料 H' 。

四、分析與討論

4.1 壓縮指標 C_c 之分析

一般而言，土層材質的粒徑越大，壓縮指標 C_c 值則越小，藉由文獻 [Lee, I. K., et al., 1983(A)]、[Das, B. M., 1994(A)]、[Lambe, T. W. and Whitman, R. V., 1969(B)] 可知，黏土的 C_c 值分佈在 10^{-1} 左右，而砂土的 C_c 值則約略分佈在 0.05~0.1(游, 1979)。本文所推估之壓縮指標，乃是以砂和礫石為主之受壓飽和含水層，有別於土壤力學及大地工程學所應用之黏土材質。參閱表 5 壓縮指標 C_c 之模式計算值變異數(Variance) σ^2 ，依細砂、粗砂、礫石三個群組排序。屏東地區取民國 71 年~89 年之平均值，雲嘉地區則取民國 70 年~87 年之平均值，將所有年度壓縮指標，皆納入平均的原因，來自於各觀測站壓縮指標 C_c 的變化幅度不大。然而年度壓縮指標計算值有所缺漏的原因，除了地盤上升之年度不予考慮之外，尚有地下水水位資料不齊全或從缺之因素，表 5 備註欄列有各觀測井所採用的年度總數，例如：屏東林邊民國 71 年~89 年的資料，19 年內僅有 18 個年度資料齊全，足以求出 C_c 值，因此取這 18 筆數據的平均值，做為林邊壓縮指標代表值。藉由此表顯示出屏東及雲嘉兩個地區之 C_c 值介於 0.0103~0.0645，小於黏土 C_c 值之分佈範圍 10^{-1} ，應屬合理。其次考慮壓縮指標 C_c 之變異數 σ^2 。由表 5 第五欄，各觀測站之變異數分佈在 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ ，以東石之變異數最大，即東石各年度壓縮指標 C_c 值的離散程度最大。

表 5 屏東及雲嘉地區壓縮指標之模式計算值暨變異數

| 觀測站 (1) | 井深 w_d (m) (2) | 井深所在位置 之土層材質 (3) | 壓縮指標 C_c (4) | 變異數 σ^2 (5) | 備註 (6)* |
|------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|
| 新 塢 | 120 | 細砂 | 0.0645 | 4.4957×10^{-7} | 民國(70-87 年) 7 筆數據平均值 |
| 中 山 | 61 | 粗砂 | 0.0525 | 1.5099×10^{-7} | 民國(70-87 年) 11 筆數據平均值 |
| 廣 溝 | 79 | 粗砂 | 0.0496 | 1.9029×10^{-7} | 民國(70-87 年) 15 筆數據平均值 |
| 四 湖 | 79 | 粗砂 | 0.0473 | 1.8645×10^{-6} | 民國(70-87 年) 5 筆數據平均值 |
| 水 林 | 125 | 粗砂 | 0.0439 | 1.0458×10^{-6} | 民國(70-87 年) 7 筆數據平均值 |
| 塢 底 | 125 | 粗砂 | 0.0401 | 1.6208×10^{-7} | 民國(70-87 年) 13 筆數據平均值 |
| 塢 豐 | 97 | 粗砂 | 0.0389 | 3.3340×10^{-7} | 民國(71-89 年) 17 筆數據平均值 |
| 大溝村 | 125 | 粗砂 | 0.0376 | $***9.8684 \times 10^{-8}$ | 民國(70-87 年) 9 筆數據平均值 |
| 金 湖 | 90 | 粗砂 | 0.0355 | 2.2063×10^{-7} | 民國(70-87 年) 10 筆數據平均值 |
| 東 石 | 138 | 粗砂 | 0.0350 | $**2.4342 \times 10^{-6}$ | 民國(70-87 年) 9 筆數據平均值 |
| 溪 頂 | 95 | 粗砂 | 0.0346 | 1.4676×10^{-7} | 民國(70-87 年) 7 筆數據平均值 |
| 林 邊 | 43 | 礫石 | 0.0331 | 2.6942×10^{-7} | 民國(71-89 年) 18 筆數據平均值 |
| 蚊 港 | 95 | 礫石 | 0.0324 | 1.7339×10^{-6} | 民國(70-87 年) 16 筆數據平均值 |
| 水底寮 | 38 | 礫石 | 0.0194 | 1.5790×10^{-6} | 民國(71-89 年) 16 筆數據平均值 |
| 佳 冬 | 97 | 礫石 | 0.0180 | 1.0357×10^{-7} | 民國(71-89 年) 8 筆數據平均值 |
| 枋 寮 | 38 | 礫石含細砂 | 0.0103 | 1.7023×10^{-7} | 民國(71-89 年) 9 筆數據平均值 |

*註 1：年度壓縮指標計算值有所缺漏的原因，除了地盤上升之年度不予考慮之外，尚有地下水水位資料不齊全或從缺之因素。

**註 2：東石站之變異數 σ^2 最大，為 2.4342×10^{-6} 。

***註 3：大溝村站之變異數 σ^2 最小，為 9.8684×10^{-8} 。

由各土層材質之壓縮指標分析，除了土壤力學領域之黏土材質的壓縮指標約為 10^{-1} ，應用於受壓飽和含水層之各類粒徑大小不同的材質，本文壓縮指標之計算結果顯示，「細砂」之壓縮指標約略分佈在 $0.064 \sim 10^{-1}$ (黏土壓縮指標之下限)；「粗砂」在 $0.034 \sim 0.064$ 的範圍內；「礫石」則在 0.034 以下。

4.2 滲透係數 K 之分析

根據實驗室透水試驗(Permeability test)的結果顯示，礫石的滲透係數 K 值介於 $10^{-2} \sim 1 \left(\frac{m}{s} \right)$ ；粗砂介於 $10^{-4} \sim 10^{-2} \left(\frac{m}{s} \right)$ ；細砂介於 $10^{-5} \sim 10^{-4} \left(\frac{m}{s} \right)$ ；黏土則小於 $10^{-8} \left(\frac{m}{s} \right)$ [Lee, I. K., et al., 1983(B)]、[Das, B. M., 1994(B)]

以及(M. E. Harr, 1962)。表 6 同樣是依細砂、粗砂、礫石三個群組排序。本研究屏東地區滲透係數模式計算值，採用民國 81 年~89 年之平均值。其中，枋寮站民國 77 年~89 年資料皆從缺，僅能以民國 72 年~76 年 5 筆數據平均值做為代表值。雲嘉地區滲透係數模式計算值，則採用民國 78 年~82 年之平均值。該表第五欄顯示各觀測站滲透係數 K 值之變異數 σ^2 ，介於 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ ，以水底寮之變異數最大，即水底寮各年度滲透係數 K 值的離散程度最大。根據上述文獻實驗室透水試驗的結果，顯示各土層材質(細砂~礫石)的滲透係數分佈範圍介於 $10^{-5} \sim 1 \left(\frac{m}{s} \right)$ ，本研究之滲透係數 K 值分佈在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \left(\frac{m}{s} \right)$ 之間，就受壓飽和含水層土壤組成概況而論，頗為合理。由表 6 第四欄，廣溝、四湖、水林、塢底、塢豐、

表 6 屏東及雲嘉地區滲透係數之模式計算值暨變異數

| 觀測站 (1) | 井深 w_d (m) (2) | 井深所在位置 之土層材質 (3) | 滲透係數 K $\left(\frac{m}{s}\right)$ (4) | 變異數 σ^2 (5) | 備註 (6)* |
|------------|------------------------|------------------------|---|-----------------------------|--------------------|
| 新塭 | 120 | 細砂 | 3.4364×10^{-3} | 2.1354×10^{-6} | 民國(78-82年) 5筆數據平均值 |
| 中山 | 61 | 粗砂 | 1.9713×10^{-2} | 5.9432×10^{-6} | 民國(78-82年) 3筆數據平均值 |
| 廣溝 | 79 | 粗砂 | 4.3204×10^{-3} | 5.9824×10^{-6} | 民國(78-82年) 5筆數據平均值 |
| 四湖 | 79 | 粗砂 | 8.0656×10^{-3} | 1.9710×10^{-5} | 民國(78-82年) 4筆數據平均值 |
| 水林 | 125 | 粗砂 | 4.4573×10^{-3} | 1.3437×10^{-5} | 民國(78-82年) 4筆數據平均值 |
| 塭底 | 125 | 粗砂 | 2.7456×10^{-3} | 2.1065×10^{-6} | 民國(78-82年) 4筆數據平均值 |
| 塭豐 | 97 | 粗砂 | 2.1900×10^{-3} | 1.2703×10^{-6} | 民國(81-89年) 7筆數據平均值 |
| 大溝村 | 125 | 粗砂 | 1.6588×10^{-3} | 1.9984×10^{-6} | 民國(78-82年) 5筆數據平均值 |
| 金湖 | 90 | 粗砂 | 1.4734×10^{-3} | 3.1713×10^{-6} | 民國(78-82年) 4筆數據平均值 |
| 東石 | 138 | 粗砂 | 7.8666×10^{-3} | 2.3685×10^{-5} | 民國(78-82年) 5筆數據平均值 |
| 溪頂 | 95 | 粗砂 | 3.1349×10^{-3} | 3.9230×10^{-6} | 民國(78-82年) 4筆數據平均值 |
| 林邊 | 43 | 礫石 | 1.2096×10^{-2} | 1.7568×10^{-5} | 民國(81-89年) 6筆數據平均值 |
| 蚊港 | 95 | 礫石 | 5.0911×10^{-3} | 1.3318×10^{-5} | 民國(78-82年) 5筆數據平均值 |
| 水底寮 | 38 | 礫石 | 1.2045×10^{-2} | $***7.1603 \times 10^{-5}$ | 民國(81-89年) 7筆數據平均值 |
| 佳冬 | 97 | 礫石 | 1.6722×10^{-2} | **無變異數 | 民國(81-89年) 僅 1筆數據 |
| 枋寮 | 38 | 礫石含細砂 | 1.9612×10^{-3} | $****6.4178 \times 10^{-7}$ | 民國(72-76年) 5筆數據平均值 |

*註 1：年度滲透係數計算值有所缺漏的原因，除了地盤上升之年度不予考慮外，尚有地下水位資料不齊全或從缺之因素。其中，枋寮站民國(77-89年)資料皆從缺，僅能以民國(72-76年) 5筆數據平均值做為代表值。

**註 2：佳冬站僅一筆數據，因此無變異數。

***註 3：水底寮站之變異數 σ^2 最大，為 7.1603×10^{-5} 。

****註 4：枋寮站之變異數 σ^2 最小，為 6.4178×10^{-7} 。

大溝村、金湖、東石、溪頂等九個觀測站之井深 w_d 一帶的 K 值，皆符合實驗室粗砂透水試驗的結果， $10^{-4} \sim 10^{-2} \left(\frac{m}{s}\right)$ ；林邊、水底寮、佳冬等三個觀測站之井深 w_d 附近的 K 值，亦合乎實驗室礫石透水試驗的結果， $10^{-2} \sim 1 \left(\frac{m}{s}\right)$ 。實驗室透水試驗文獻已述於本段開頭。剩餘四個觀測站(新塭、中山、蚊港、枋寮)， K 之模式計算值，並未落在實驗室透水試驗各土層材質分佈範圍以內，並以新塭站差距較大，其合理的理由來自於新塭地區民國 78 年擴散係數 D 之估算值偏高，導致滲透係數 K 值相對偏高，各年度加以平均的結果，反應出該區滲透係數代表值高於透水試驗細砂的 K 值。

4.3 地下水位資料及沉陷檢測資料對於 C_c 及 K 之影響分析

本文所引用之地下水位觀測資料，相關因子計有 h_{ave} 、 Δh_{max} 、 $\frac{\partial h}{\partial t}$ ，沉陷檢測資料則為 H' 。將上述四個因子的原始數據 $\pm 10\%$ ，對於 C_c 及 K 的影響做分析。

表 7 顯示 $h_{ave} \pm 10\%$ 對於 C_c 的影響最甚者，皆出現在中山，這來自該站各年度 h_{ave} 的改變甚大， $\pm 10\%$ 的調整之後，差距值較大，並反應在 σ_o' 的影響較劇烈，因此 C_c 的改變也比較明顯。表 8 說明了 $\Delta h_{max} \pm 10\%$ 對於 C_c 影響最顯著者，同為枋寮。枋寮的歷年 Δh_{max} 變化較劇烈， $\Delta h_{max} \pm 10\%$ 加以各年度取平均的結果導致影響

表 7 $h_{ave} \pm 10\%$ 對於 C_C 值之影響分析

| 地區 (1) | 觀測站 (2) | 壓縮指標 C_C (原始計算值) (3) | 壓縮指標 C_C ($h_{ave} + 10\%$) (4) | 影響百分比 (5) | 壓縮指標 C_C ($h_{ave} - 10\%$) (6) | 影響百分比 (7) |
|-----------------|------------|------------------------------|---|--------------|---|--------------|
| 屏東地區 | 林邊 | 0.0331 | 0.0318 | -4.0123% | 0.0344 | 4.0123% |
| | 佳冬 | 0.0180 | 0.0178 | -0.9615% | 0.0183 | 1.9231% |
| | 塭豐 | 0.0389 | 0.0385 | -1.0753% | 0.0393 | 1.0753% |
| | 水底寮 | 0.0194 | 0.0188 | -3.3333% | 0.0200 | 3.3333% |
| | 枋寮 | 0.0103 | 0.0101 | -2.0000% | 0.0105 | 2.0000% |
| 雲嘉地區 | 中山 | 0.0525 | 0.0497 | *-5.2632% | 0.0553 | **5.2632% |
| | 蚊港 | 0.0324 | 0.0310 | -4.2424% | 0.0338 | 4.2424% |
| | 溪頂 | 0.0346 | 0.0336 | -2.8902% | 0.0356 | 2.8902% |
| | 廣溝 | 0.0496 | 0.0478 | -3.5714% | 0.0513 | 3.3613% |
| | 四湖 | 0.0473 | 0.0458 | -3.2751% | 0.0488 | 3.2751% |
| | 金湖 | 0.0355 | 0.0351 | -1.1765% | 0.0359 | 1.1765% |
| | 大溝村 | 0.0376 | 0.0366 | -2.6596% | 0.0386 | 2.6596% |
| | 水林 | 0.0439 | 0.0421 | -4.1565% | 0.0456 | 3.9120% |
| | 塭底 | 0.0401 | 0.0397 | -1.0949% | 0.0405 | 1.0949% |
| | 東石 | 0.0350 | 0.0343 | -2.0000% | 0.0358 | 2.4000% |
| | 新塭 | 0.0645 | 0.0643 | -0.3413% | 0.0649 | 0.6826% |
| 16 個觀測站影響百分比平均值 | | | | -2.6283% | | 2.7064% |

*註 1 : $h_{ave}+10\%$ 對於 C_C 的最大影響百分比為-5.2632%。

**註 2 : $h_{ave}-10\%$ 對於 C_C 的最大影響百分比為 5.2632%。

表 8 $\Delta h_{max} \pm 10\%$ 對於 C_C 值之影響分析

| 地區 (1) | 觀測站 (2) | 壓縮指標 C_C (原始計算值) (3) | 壓縮指標 C_C ($\Delta h_{max} + 10\%$) (4) | 影響百分比 (5) | 壓縮指標 C_C ($\Delta h_{max} - 10\%$) (6) | 影響百分比 (7) |
|-----------------|------------|------------------------------|--|--------------|--|--------------|
| 屏東地區 | 林邊 | 0.0331 | 0.0334 | 0.9259% | 0.0328 | -0.9259% |
| | 佳冬 | 0.0180 | 0.0183 | 1.9231% | 0.0177 | -1.9231% |
| | 塭豐 | 0.0389 | 0.0391 | 0.5376% | 0.0387 | -0.5376% |
| | 水底寮 | 0.0194 | 0.0198 | 2.2222% | 0.0190 | -2.2222% |
| | 枋寮 | 0.0103 | 0.0107 | *4.0000% | 0.0099 | ** -4.0000% |
| 雲嘉地區 | 中山 | 0.0525 | 0.0530 | 0.8772% | 0.0520 | -0.8772% |
| | 蚊港 | 0.0324 | 0.0327 | 0.9091% | 0.0321 | -0.9091% |
| | 溪頂 | 0.0346 | 0.0348 | 0.5780% | 0.0344 | -0.5780% |
| | 廣溝 | 0.0496 | 0.0498 | 0.4202% | 0.0493 | -0.6303% |
| | 四湖 | 0.0473 | 0.0475 | 0.4367% | 0.0470 | -0.6550% |
| | 金湖 | 0.0355 | 0.0356 | 0.3922% | 0.0354 | -0.3922% |
| | 大溝村 | 0.0376 | 0.0378 | 0.5319% | 0.0375 | -0.2660% |
| | 水林 | 0.0439 | 0.0441 | 0.4890% | 0.0436 | -0.7335% |
| | 塭底 | 0.0401 | 0.0404 | 0.7299% | 0.0400 | -0.3650% |
| | 東石 | 0.0350 | 0.0353 | 0.8000% | 0.0347 | -0.8000% |
| | 新塭 | 0.0645 | 0.0649 | 0.6826% | 0.0643 | -0.3413% |
| 16 個觀測站影響百分比平均值 | | | | 1.0285% | | -1.0098% |

*註 1 : $\Delta h_{max}+10\%$ 對於 C_C 的最大影響百分比為 4.0000%。

**註 2 : $\Delta h_{max}-10\%$ 對於 C_C 的最大影響百分比為-4.0000%。

表 9 $h_{ave} \pm 10\%$ 對於 K 值之影響分析

| 地區 (1) | 觀測站 (2) | 滲透係數 K (原始計算值) (3) | 滲透係數 K ($h_{ave} + 10\%$) (4) | 影響百分比 (5) | 滲透係數 K ($h_{ave} - 10\%$) (6) | 影響百分比 (7) |
|-----------------|------------|----------------------------|---|--------------|---|--------------|
| 屏東地區 | 林邊 | 1.2096×10^{-2} | 1.1259×10^{-2} | -6.9196% | 1.2986×10^{-2} | 7.3578% |
| | 佳冬 | 1.6722×10^{-2} | 1.6428×10^{-2} | -1.7566% | 1.7018×10^{-2} | 1.7688% |
| | 塭豐 | 2.1900×10^{-3} | 2.1612×10^{-3} | -1.3151% | 2.2190×10^{-3} | 1.3242% |
| | 水底寮 | 1.2045×10^{-2} | 1.1275×10^{-2} | -6.3927% | 1.2857×10^{-2} | 6.7414% |
| | 枋寮 | 1.9612×10^{-3} | 1.9108×10^{-3} | -2.5699% | 2.0124×10^{-3} | 2.6106% |
| 雲嘉地區 | 中山 | 1.9713×10^{-2} | 1.7967×10^{-2} | *-8.8571% | 2.1600×10^{-2} | **9.5724% |
| | 蚊港 | 5.0911×10^{-3} | 4.7525×10^{-3} | -6.6508% | 5.4457×10^{-3} | 6.9651% |
| | 溪頂 | 3.1349×10^{-3} | 2.9937×10^{-3} | -4.5041% | 3.2807×10^{-3} | 4.6509% |
| | 廣溝 | 4.3204×10^{-3} | 4.0743×10^{-3} | -5.6962% | 4.5778×10^{-3} | 5.9578% |
| | 四湖 | 8.0656×10^{-3} | 7.7372×10^{-3} | -4.0716% | 8.4028×10^{-3} | 4.1807% |
| | 金湖 | 1.4734×10^{-3} | 1.4462×10^{-3} | -1.8461% | 1.5010×10^{-3} | 1.8732% |
| | 大溝村 | 1.6588×10^{-3} | 1.5824×10^{-3} | -4.6057% | 1.7383×10^{-3} | 4.7926% |
| | 水林 | 4.4573×10^{-3} | 4.1870×10^{-3} | -6.0642% | 4.7388×10^{-3} | 6.3155% |
| | 塭底 | 2.7456×10^{-3} | 2.7008×10^{-3} | -1.6317% | 2.7908×10^{-3} | 1.6463% |
| | 東石 | 7.8666×10^{-3} | 7.6062×10^{-3} | -3.3102% | 8.1342×10^{-3} | 3.4017% |
| | 新塭 | 3.4364×10^{-3} | 3.4101×10^{-3} | -0.7653% | 3.4629×10^{-3} | 0.7712% |
| 16 個觀測站影響百分比平均值 | | | | -4.1848% | | 4.3706% |

*註 1： $h_{ave} + 10\%$ 對於 K 的最大影響百分比為 -8.8571%。

**註 2： $h_{ave} - 10\%$ 對於 K 的最大影響百分比為 9.5724%。

C_c 最明顯。至於 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 與 H' 的增減，則不影響 C_c 值，原因來自於本模式計算 C_c 時，不須利用上兩項資料。

由表 9， $h_{ave} \pm 10\%$ 對 K 的影響最甚者，皆發生在中山，這來自 h_{ave} 的劇烈改變因而造成中山的 p 值變動較劇烈，直接影響 N 值，並反應在 D 值上，因此最後造成 K 值的改變最明顯。由表 10， $\Delta h_{max} \pm 10\%$ 對 K 的影響最最深者，都發生在枋寮，枋寮其處的歷年 Δh_{max} 變化較劇烈，故造成 $\Delta \sigma'$ 的變化大於其他觀測井，並反應在 N 值及 D 值，所以導致 K 值的改變最顯著。藉由表 11 及表 12 可以明顯看出， $\frac{\partial h}{\partial t} \pm 10\%$ 對 K 的影響百分比分別分佈在 -10.5%~-10.3% 以及 10.3%~10.5% 之間。另， $H' \pm 10\%$ 對 K 的影響百分比依序分佈在 -9.5%~-9.4% 以及 11.5%~11.7% 之間。 h_{ave} 、 Δh_{max} 、 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 、 H' 的改變皆會影響 K 值。

其中以 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 及 H' 的改變，約略與 K 值成反比；此二因子的誤差，影響 K 值最甚，誤差的多寡，立即以近似等比例的線性反比關係反應在 K 值上。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 利用地下水位歷線與沉陷檢測資料，配合水井普查統計資料及土層材質與組織結構等相關資料，可用以推求壓縮指標 C_c 以及滲透係數 K 。其中， C_c 的推求並不需要利用沉陷檢測資料。
2. 本文的運用僅侷限於受壓飽和含水層，此層之土壤組織大多以砂和礫石為主，換言之，壓縮指標 C_c 以及滲透係數 K 的推估，乃是以砂和礫石為主之土層，有別於土壤力學領域應用在黏土材質之壓縮指標推估。
3. 本研究地層下陷近似模式，式(5)，主要目

表 10 $\Delta h_{\max} \pm 10\%$ 對於 K 值之影響分析

| 地區 (1) | 觀測站 (2) | 滲透係數 K (原始計算值) (3) | 滲透係數 K ($\Delta h_{\max} + 10\%$) (4) | 影響百分比 (5) | 滲透係數 K ($\Delta h_{\max} - 10\%$) (6) | 影響百分比 (7) |
|-----------------|------------|----------------------------|---|--------------|---|--------------|
| 屏東 地區 | 林邊 | 1.2096×10^{-2} | 1.2225×10^{-2} | 1.0665% | 1.1966×10^{-2} | -1.0747% |
| | 佳冬 | 1.6722×10^{-2} | 1.7096×10^{-2} | 2.2354% | 1.6344×10^{-2} | -2.2598% |
| | 塭豐 | 2.1900×10^{-3} | 2.2063×10^{-3} | 0.7443% | 2.1736×10^{-3} | -0.7489% |
| | 水底寮 | 1.2045×10^{-2} | 1.2310×10^{-2} | 2.2001% | 1.1777×10^{-2} | -2.2250% |
| | 枋寮 | 1.9612×10^{-3} | 2.2045×10^{-3} | *3.2276% | 1.8969×10^{-3} | ** -3.2786% |
| 雲嘉 地區 | 中山 | 1.9713×10^{-2} | 1.9884×10^{-2} | 0.8674% | 1.9541×10^{-2} | -0.8725% |
| | 蚊港 | 5.0911×10^{-3} | 5.1360×10^{-3} | 0.8819% | 5.0459×10^{-3} | -0.8878% |
| | 溪頂 | 3.1349×10^{-3} | 3.1555×10^{-3} | 0.6571% | 3.1143×10^{-3} | -0.6571% |
| | 廣溝 | 4.3204×10^{-3} | 4.3466×10^{-3} | 0.6064% | 4.2942×10^{-3} | -0.6064% |
| | 四湖 | 8.0656×10^{-3} | 8.1231×10^{-3} | 0.7129% | 8.0077×10^{-3} | -0.7179% |
| | 金湖 | 1.4734×10^{-3} | 1.4843×10^{-3} | 0.7398% | 1.4624×10^{-3} | -0.7466% |
| | 大溝村 | 1.6588×10^{-3} | 1.6647×10^{-3} | 0.3557% | 1.6528×10^{-3} | -0.3617% |
| | 水林 | 4.4573×10^{-3} | 4.4950×10^{-3} | 0.8458% | 4.4193×10^{-3} | -0.8525% |
| | 塭底 | 2.7456×10^{-3} | 2.7640×10^{-3} | 0.6702% | 2.7272×10^{-3} | -0.6702% |
| | 東石 | 7.8666×10^{-3} | 7.9548×10^{-3} | 1.1212% | 7.7779×10^{-3} | -1.1276% |
| | 新塭 | 3.4364×10^{-3} | 3.4551×10^{-3} | 0.5442% | 3.4177×10^{-3} | -0.5442% |
| 16 個觀測站影響百分比平均值 | | | | 1.0923% | | -1.1020% |

*註 1： $\Delta h_{\max} + 10\%$ 對於 K 的最大影響百分比為 3.2276%。

**註 2： $\Delta h_{\max} - 10\%$ 對於 K 的最大影響百分比為 -3.2786%。

的在於反求擴散係數 D ，以及包含在擴散係數定義裡的滲透係數 K 。實際應用上，無因次空間座標 ξ 與無因次時間 τ 均須為已知。

- 利用式(10)求擴散係數 D 值，進而續求滲透係數 K 值時，必須先掌握實測抽水量。然而實測抽水量非常難以獲得，因此改採用式(8)，利用受壓飽和含水層水平面積 A_{soil} ，配合地下水位變化率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 間接可求得抽水量 Q 。
- 本文壓縮指標 C_c 之計算結果顯示，「細砂」之壓縮指標約略分佈在 0.064~0.1；「粗砂」在 0.034~0.064 的範圍內；「礫石」則在 0.034 以下。然而，砂與礫石的壓縮指標數據鮮少，除了「砂土」之壓縮指標實測值，與本模式「細砂」之壓縮指標計算值大致符合以外，其餘材質，則無法有效確認本模式計算值之合理性與否，故尚須進一步摸

索與探討。

- 本研究滲透係數 K 之計算結果，大致符合實驗室透水試驗各土層材質的試驗數據，即礫石的滲透係數 K 值介於 $10^{-2} \sim 1\left(\frac{m}{s}\right)$ ；粗砂介於 $10^{-4} \sim 10^{-2}\left(\frac{m}{s}\right)$ ；細砂介於 $10^{-5} \sim 10^{-4}\left(\frac{m}{s}\right)$ 。
- 同一觀測站壓縮指標 C_c 及滲透係數 K 的變異數 σ^2 ，前者的變異數比後者的變異數小，其比值大概為 1~0.01。此一結果顯示，各年度滲透係數 K 值的離散程度遠大於壓縮指標 C_c 值。
- h_{ave} 與 Δh_{\max} 改變 $\pm 10\%$ ， C_c 值的變動大致只有 -2.6283%、2.7064% 以及 1.0285%、-1.0098%。因此， h_{ave} 的改變對於 C_c 值的影響甚於 Δh_{\max} 。至於 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 與 H' 的增減，則

表 11 $\frac{\partial h}{\partial t} \pm 10\%$ 對於 K 值之影響分析

| 地區 | 觀測站 | 滲透係數 K (原始計算值) | 滲透係數 K ($\frac{\partial h}{\partial t} + 10\%$) | 影響百分比 | 滲透係數 K ($\frac{\partial h}{\partial t} - 10\%$) | 影響百分比 |
|-----------------|-----|-------------------------|--|-----------|--|----------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5)* | (6) | (7)** |
| 屏東地區 | 林邊 | 1.2096×10^{-2} | 1.0842×10^{-2} | -10.3671% | 1.3355×10^{-2} | 10.4084% |
| | 佳冬 | 1.6722×10^{-2} | 1.4990×10^{-2} | -10.3605% | 1.8461×10^{-2} | 10.3999% |
| | 塭豐 | 2.1900×10^{-3} | 1.9625×10^{-3} | -10.3881% | 2.4183×10^{-3} | 10.4247% |
| | 水底寮 | 1.2045×10^{-2} | 1.0795×10^{-2} | -10.3778% | 1.3300×10^{-2} | 10.4193% |
| | 枋寮 | 1.9612×10^{-3} | 1.7573×10^{-3} | -10.3967% | 2.1659×10^{-3} | 10.4375% |
| 雲嘉地區 | 中山 | 1.9713×10^{-2} | 1.7668×10^{-2} | -10.3739% | 2.1765×10^{-2} | 10.4094% |
| | 蚊港 | 5.0911×10^{-3} | 4.5621×10^{-3} | -10.3907% | 5.6221×10^{-3} | 10.4300% |
| | 溪頂 | 3.1349×10^{-3} | 2.8090×10^{-3} | -10.3959% | 3.4621×10^{-3} | 10.4373% |
| | 廣溝 | 4.3204×10^{-3} | 3.8710×10^{-3} | -10.4018% | 4.7717×10^{-3} | 10.4458% |
| | 四湖 | 8.0656×10^{-3} | 7.2270×10^{-3} | -10.3972% | 8.9075×10^{-3} | 10.4382% |
| | 金湖 | 1.4734×10^{-3} | 1.3201×10^{-3} | -10.4045% | 1.6273×10^{-3} | 10.4452% |
| | 大溝村 | 1.6588×10^{-3} | 1.4863×10^{-3} | -10.3991% | 1.8319×10^{-3} | 10.4353% |
| | 水林 | 4.4573×10^{-3} | 3.9943×10^{-3} | -10.3875% | 4.9220×10^{-3} | 10.4256% |
| | 塭底 | 2.7456×10^{-3} | 2.4601×10^{-3} | -10.3985% | 3.0323×10^{-3} | 10.4422% |
| | 東石 | 7.8666×10^{-3} | 7.0502×10^{-3} | -10.3781% | 8.6862×10^{-3} | 10.4187% |
| | 新塭 | 3.4364×10^{-3} | 3.0789×10^{-3} | -10.4033% | 3.7954×10^{-3} | 10.4470% |
| 16 個觀測站影響百分比平均值 | | | | -10.3888% | | 10.4290% |

*註 1： $\frac{\partial h}{\partial t} + 10\%$ 對於 K 的影響百分比分佈在 -10.5%~-10.3% 之間。

**註 2： $\frac{\partial h}{\partial t} - 10\%$ 對於 K 的影響百分比分佈在 10.3%~10.5% 之間。

不影響 C_c 值，原因來自於本模式計算 C_c 時，不須利用上兩項資料。

9. h_{ave} 、 Δh_{max} 、 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 、 H' 的改變皆會影響 K

值，其中以後兩者的影響最甚。 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 改變 $\pm 10\%$ ， K 值的變動約為 $\mp 10.4\%$ ； H' 改變 $\pm 10\%$ ， K 值的變動則分別為 -9.4% 以及 11.6%。後兩因子的改變，均立即以近似等比例的線性反比關係反應在 K 值上。

5.2 建議

1. 利用地下水位歷線，可間接獲得受力情形，並推估壓縮指標，是一有別於傳統由直接量測受力與沉陷而獲得壓縮指標的方法。此一方法之優點甚多，但是適用性及

可靠性有待進一步深入且廣泛的探討。

2. 由式(8)，利用地下水位變率 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 取代難以獲

得抽水量 Q 的瓶頸是一值得提倡的方法，但必須深入探討式中難以準確估算的 A_{soil} 值。本文嘗試以各觀測點之 A_{soil} 比，相當於各觀測點間之地面面積比，再引用徐昇氏多邊形法的觀念劃分地面控制面積，以求各區的 A_{soil} 值。這方法看起來蠻合理，但未能涵蓋相關因素之影響，實為爾後研究的新課題。

3. K 值的合理性與否，可先透過各土層材質滲透係數的分佈範圍做初步驗證與比較，此舉將有助於檢視滲透係數實測值的正確性。

表 12 H'±10% 對於 K 值之影響分析

| 地區 (1) | 觀測站 (2) | 滲透係數 K (原始計算值) (3) | 滲透係數 K (H'+10%) (4) | 影響百分比 (5)* | 滲透係數 K (H'-10%) (6) | 影響百分比 (7)** |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------|
| 屏東 地區 | 林 邊 | 1.2096×10 ⁻² | 1.0956×10 ⁻² | -9.4246% | 1.3495×10 ⁻² | 11.5658% |
| | 佳 冬 | 1.6722×10 ⁻² | 1.5147×10 ⁻² | -9.4205% | 1.8655×10 ⁻² | 11.5569% |
| | 塭 豐 | 2.1900×10 ⁻³ | 1.9832×10 ⁻³ | -9.4429% | 2.4437×10 ⁻³ | 11.5845% |
| | 水底寮 | 1.2045×10 ⁻² | 1.0908×10 ⁻² | -9.4396% | 1.3440×10 ⁻² | 11.5816% |
| | 枋 寮 | 1.9612×10 ⁻³ | 1.7758×10 ⁻³ | -9.4534% | 2.1887×10 ⁻³ | 11.6000% |
| 雲嘉 地區 | 中 山 | 1.9713×10 ⁻² | 1.7854×10 ⁻² | -9.4303% | 2.1994×10 ⁻² | 11.5710% |
| | 蚊 港 | 5.0911×10 ⁻³ | 4.6101×10 ⁻³ | -9.4479% | 5.6813×10 ⁻³ | 11.5928% |
| | 溪 頂 | 3.1349×10 ⁻³ | 2.8386×10 ⁻³ | -9.4517% | 3.4986×10 ⁻³ | 11.6016% |
| | 廣 溝 | 4.3204×10 ⁻³ | 3.9118×10 ⁻³ | -9.4575% | 4.8219×10 ⁻³ | 11.6077% |
| | 四 湖 | 8.0656×10 ⁻³ | 7.3031×10 ⁻³ | -9.4537% | 9.0013×10 ⁻³ | 11.6011% |
| | 金 湖 | 1.4734×10 ⁻³ | 1.3341×10 ⁻³ | -9.4543% | 1.6444×10 ⁻³ | 11.6058% |
| | 大溝村 | 1.6588×10 ⁻³ | 1.5020×10 ⁻³ | -9.4526% | 1.8512×10 ⁻³ | 11.5987% |
| | 水 林 | 4.4573×10 ⁻³ | 4.0363×10 ⁻³ | -9.4452% | 4.9738×10 ⁻³ | 11.5877% |
| | 塭 底 | 2.7456×10 ⁻³ | 2.4860×10 ⁻³ | -9.4551% | 3.0643×10 ⁻³ | 11.6077% |
| | 東 石 | 7.8666×10 ⁻³ | 7.1243×10 ⁻³ | -9.4361% | 8.7775×10 ⁻³ | 11.5793% |
| 新 塭 | 3.4364×10 ⁻³ | 3.1113×10 ⁻³ | -9.4605% | 3.8354×10 ⁻³ | 11.6110% | |
| 16 個觀測站影響百分比平均值 | | | | -9.4454% | | 11.5908% |

*註 1：H'+10%對於 K 的影響百分比分佈在-9.5%~-9.4%之間。

**註 2：H'-10%對於 K 的影響百分比分佈在 11.5%~11.7%之間。

4. 本模式所推估之壓縮指標 C_c 與滲透係數 K ，建議可引用異於本文沉陷區的觀測數據所獲得之計算結果，予以比較，或由其他方法所求得之結果，相互比較分析。使本模式能獲得進一步的確認與應用。

參考文獻

- Amossow, S., "Some Problems of Heat Conductivity Connected with Electric Welding." Transaction of the Leningrad Industrial Institute, no.4 (Section of Physics and Mathematics), pp.3-9, 1937.
- Carlsaw, H. S. and J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids." 2nd ed., Oxford University Press, London, pp.353-357, 1959.
- Das, B. M., "Principles of Geotechnical Engineering." 3rd ed., PWS Publishing Co., New York, pp.273(A), pp.134(B), 1994.
- Farlow, S. J., "Partial Differential Equations for Scientists and Engineers." Dover Publications, INC., pp.93-95, 1982.
- Lambe T. W. and Whitman R. V., "Soil Mechanics." John Wiley & Sons, INC., pp.159-160(A), pp.323(B), 1969.
- Lee, I. K., White Weeks and Ingles, O. G., "Geotechnical Engineering." Pitman Publishing INC., pp.190(A), pp.154(B), 1983.
- M. E. Harr, "Groundwater and Seepage." McGraw-Hill, INC., New York, pp.8, 1962.
- Sowers, G. B. and Sowers, G. F., "Introductory Soil Mechanics and Foundation." pp.41, 1970.
- 江崇榮，「濁水溪沖積扇主要地下水層之水力參數評估」，經濟部中央地質調查所，第 26 頁，2000。
- 李建興，「雲嘉地區地層下陷控制參數之探討」，淡江大學水資源及環境工程研究所碩

- 士論文，2000。
11. 灣省屏東農田水利會，「屏東縣林邊溫豐地區地盤下陷調查研究地下水井普查魚塭灌溉面積調查工作報告」，1980。
 12. 施清吉，「地盤下陷與超額地下水抽取量間之關係分析」，土木水利季刊，第三卷，第二期，第 1~16 頁，1976。
 13. 施清吉，「抽取地下水導致孔隙壓變化之探討」，中國農業工程學報，第四十四卷，第三期，第 9~24 頁，1998。
 14. 陳鑑銘，「屏東地區地層下陷之近似模式」，淡江大學水資源及環境工程研究所碩士論文，2001。
 15. 游啓亨，「土壤力學實驗法」，第四版，國立成功大學土木工程學系，第 50 頁，1979。

收稿日期：民國 94 年 6 月 28 日

修正日期：民國 95 年 1 月 10 日

接受日期：民國 95 年 1 月 16 日