

蘭陽地區地層下陷及海水入侵之研究

Land Subsidence and Seawater Intrusion

In Lan Yang Area

國立宜蘭農工專校土木科副教授

黃 賢 統

S. T. Hwang

摘 要

地層下陷及海水入侵乃超抽地下水對環境上最不利的衝擊，因其不僅甚難補救，無法再生還原，更衍生許多不良的後果，諸如影響結構物安全，減低防洪工程效益，破壞含水層機能及導致水質劣化等問題。蘭陽地區之含水層本屬補注優良之最佳含水層，惜近年來由於開發不當，超抽地下水，導致本地區全面性之地盤下陷，本文根據臺灣省水利局在蘭陽地區所設置的地下水位觀測井長期記錄，對照其民國77年3月、78年6月及79年6月等三次之地盤下陷檢測成果報告，分析研判，冀能全面建立預測及監控資料，經由歷年水位資料檢討預壓沉陷後，求得其中10口觀測井之單位洩降所產生之沉陷量，實測值分別約為1/7~1/44，估算最大值則約為1/4~1/39，經推算各井點完成95%最大沉陷所須之時間分別約為6~36年，本文另於各觀測井採集水樣送驗，分析其電導度、氯鹽及鈉鹽含量，其中3口井氯鹽濃度與海水濃度之比值分別約為3%~23%，已有海水入侵明顯之跡象。本文之現況分析及預測研判，除可供吾人及早面對問題，謀求本地區含水層資源之永續不絕，並作為將來逐步建立數學模式之基礎。

ABSTRACT

In Lan Yang area, pumping of ground water resulted in land subsidence and sea water intrusion. Those serious problems can't be easily solved and hence cause terrible effects-influence the safety of building, reduce the effectiveness of flood control, and deteriorate the function of aquifer as well as the quality of ground water.

In fact, the aquifer of Lan Yang area is one of the best in Taiwan. Unfortunately, too many wells for pumping ground water cause land subsidence which was widely existed in this area. According to long-time data of water level at observation wells established by the Water Conservancy Bureau of Taiwan Provincial Government in Lan Yang area and prior surveys for land subsidence

of Mar. 1988, June 1989, and June 1990, the ratios of subsidence to water level change is between 1/7 and 1/44 while the maximum values of prediction is from 1/4 to 1/39. On the other hand the 95 percent of maximum subsidence will occur in time intervals range from 6 years to 36 years. Water samples were taken from the wells and their electrical conductance, concentrations of chloride and sodium were analyzed. The concentrations of chloride compare to sea water is from 3% to 23%. Therefore, the aquifer has been intruded is quite obvious.

This research paper not only provides precise analysis and predictions but also reminds the local authority to face the problems, protect and preserve ground water resources forever and establish the basic concept according to the results of the mathematical models.

一、前 言

蘭陽地區雨量豐沛，地下水之涵養良好，補注迅速，本屬極為優良之含水層，近年來由於開發不當，抽水量超出補注量，地下水位逐漸降低，導致土層所承受之有效應力增加而產生地盤下陷。同時，淡水與海水之交界面，由於水壓力的失去平衡，不斷向內陸推進，水質因而劣化。臺灣省水利局為掌握本地區地下水位之變化，自民國65年7月起建立水位觀測井17口，每月定期觀測水位，並於74年7月起在礁溪建立地盤下陷檢測站一處，兼作水位觀測之用，合計共有水位觀測井18口。另該局為瞭解地盤下陷之情況，在行政院農業委員會的經費補助下，自民國76年7月起至80年6月止，分四期對本地區之高程全面追蹤檢測，目前已完成第三期作業成果。本研究在有限資料之下，希望經由長期水位紀錄與地盤下陷檢測資料整理分析，並由觀測井內所取得的水樣送驗，達成下列目標：

1. 建立不同位置沉陷量與水位下降的關係
2. 估算該水位最大之沉陷量
3. 預測完成95%最大沉陷量所需之時間
4. 海水入侵之確實位置
5. 水質鹽化之濃度
6. 及早面對問題謀求解決之道
7. 提供作為逐步建立良好數學模式的參考。

二、研究區域概況

1. 地理環境與地質

蘭陽平原又稱宜蘭平原，北起頭城，南止於蘇澳，東濱太平洋，西臨山麓，略呈等邊三角形，面積約四百平方公里，地理特性輪廓鮮明，本地區主要之河流計有蘭陽溪、冬山河、宜蘭河、金面溪、福德溪、得子口溪及新城溪等7條，蘭陽溪由西向東貫穿本平原，在河口處與冬山河及宜蘭河匯集而流入太平洋。本平原係溪流由中央山脈挾帶堆積物形成，屬於第四紀岩層，組織物則為板岩、砂岩及片麻岩等之卵石、礫石、砂及粘土等，沖積層顆粒由粗礫向下游逐漸變為細砂，為一典型之沖積平原。本平原之導水係數由 $0.01 \sim 9.5 \text{m}^2/\text{min}^{(5)}$ ，透水性及補注情況十分良好，厚度由10公尺至150公尺不等，上游有局部性之沖積臺地，下游從鐵路以東為海岸沖積平原，土層則分佈於全區，以沖積層與海岸交接處為最厚，蘭陽平原之含水層為本省最佳含水層之一。

2. 降雨及補注

本地區之降雨量極為豐沛，由位於山麓之五峯雨量觀測站（標高140m）自民國70年1月至79年12月之紀錄可知，最大月雨量發生於77年9月曾達1798公厘，當年年雨量則達4694公厘，另位於平地之冬山雨量觀測站，自民國48年1月至79年12月之紀錄中，其月雨量在63年10月達2546公厘，而當年年雨量則高達7581公厘，兩雨量觀測站其月雨量之變化及其附近地下水位觀測井每月觀測水位歷線之對照，詳如圖1，雖然本區含水層之透水性良好，並可迅速接受來自山麓降雨與河川之入滲及涵養

，經由民國77年礁溪自記觀測井日平均水位歷線與五峯雨量站日雨量變化線，分析其相關係數 (Coefficient of correlation) ⁽¹⁾推算得補注時間約為3天，請參閱表1及圖2，可見其補注容易而便捷，但因河川流短而坡陡，故大部份流入海洋，無法利用，殊為可惜。

蘭陽平原三面環山，對地下水而言形成一封闭之盆地，地下水位之消長，主要決定於入滲及涵養之補注與地下水井之抽用，民國72年，本區之年補注量約為 $120 \times 10^6 m^3$ ，年抽水量約 $87 \times 10^6 m^3$ ，其中農業用水佔13%，工業用水佔49%，公共及家庭用水佔38%⁽⁶⁾，地下水開發僅達年補注量的72%。近年來，由於養殖業的興起，過度的依賴地下水源，抽水養殖，因而大部份地點地下水位逐年降低，顯示抽水量已超過補注量。

3. 地下水位

臺灣省水利局為充份瞭解並掌握本地區之地下水情況，自民國65年7月起在本地區設置地下水位

觀測井17口，每月20~25日定期量測水位，並於74年7月於礁溪設立沉陷觀測站一處，亦兼作自記水位觀測之用。觀測井資料及位置請參閱表2，本地區觀測井密度約每22.2平方公里1口，各井歷年之最低水位詳如表3，最大水位差超過3公尺者計有大福補天宮、大隱國小及水利會冬山工作站等3井，而以大福補天宮最為嚴重，因其不但最大水位差為6.3公尺，形成一洩降錐，更且其水位低達-5.8公尺，將造成海水入侵之嚴重後果，另由表中亦可看出除該站外，其餘各站，最近一、二年之水位已有平穩甚或回升之情況。各站歷年之水位歷線，請參閱圖3，65年7月至66年6月與78年7月至79年6月各月份地下水位等高線之對照圖，詳如圖4，由各對照圖可看出本區地下水之流向，除大福補天宮之洩降錐外，大致均由西向東，鐵路以西之山麓區14年以來標高5公尺等水位線之位置幾乎沒有變動，鐵路以東在5~8月份間各井之水位均明顯下降。

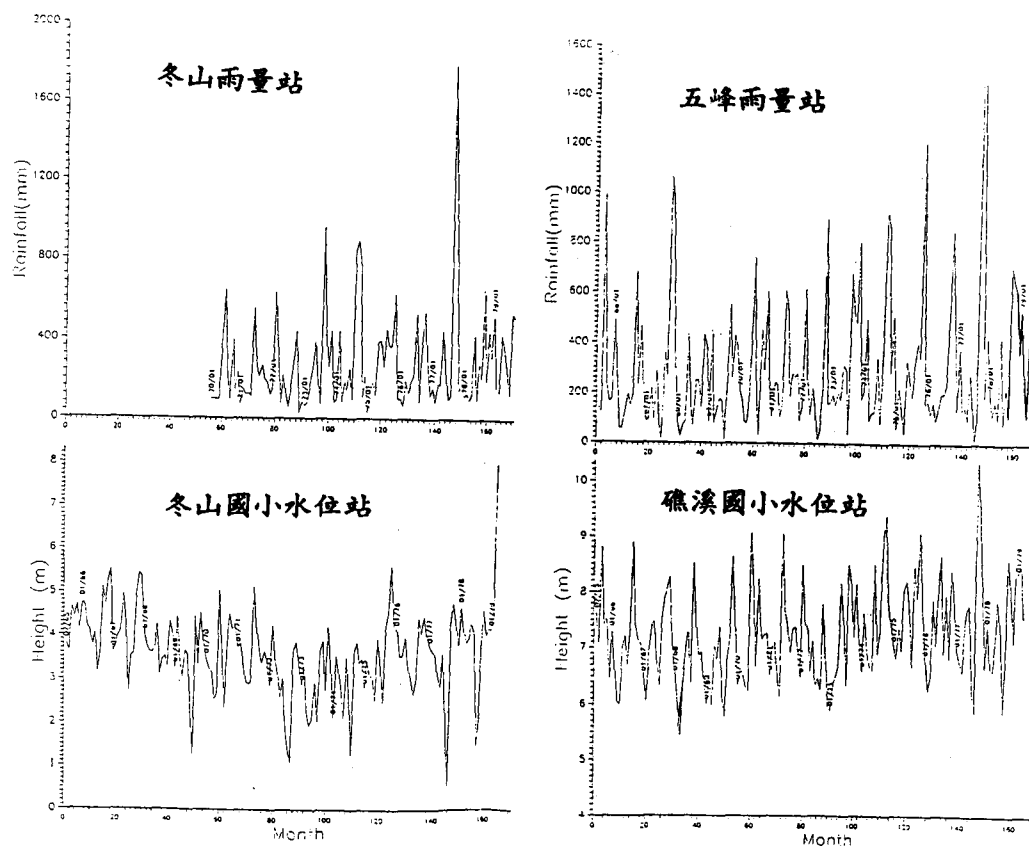
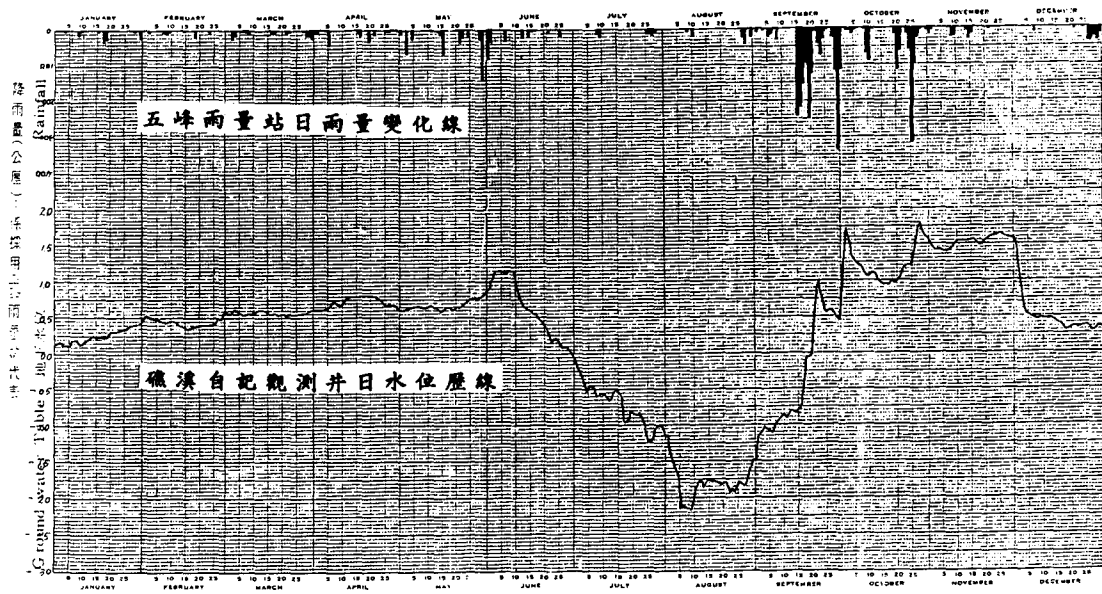


圖1. 雨量站月雨量變化~地下水位觀測井水位歷線關係圖



民國77年

資料供提：臺灣省水利局第一工程處

圖2. 自記觀測井日平均水位歷線圖

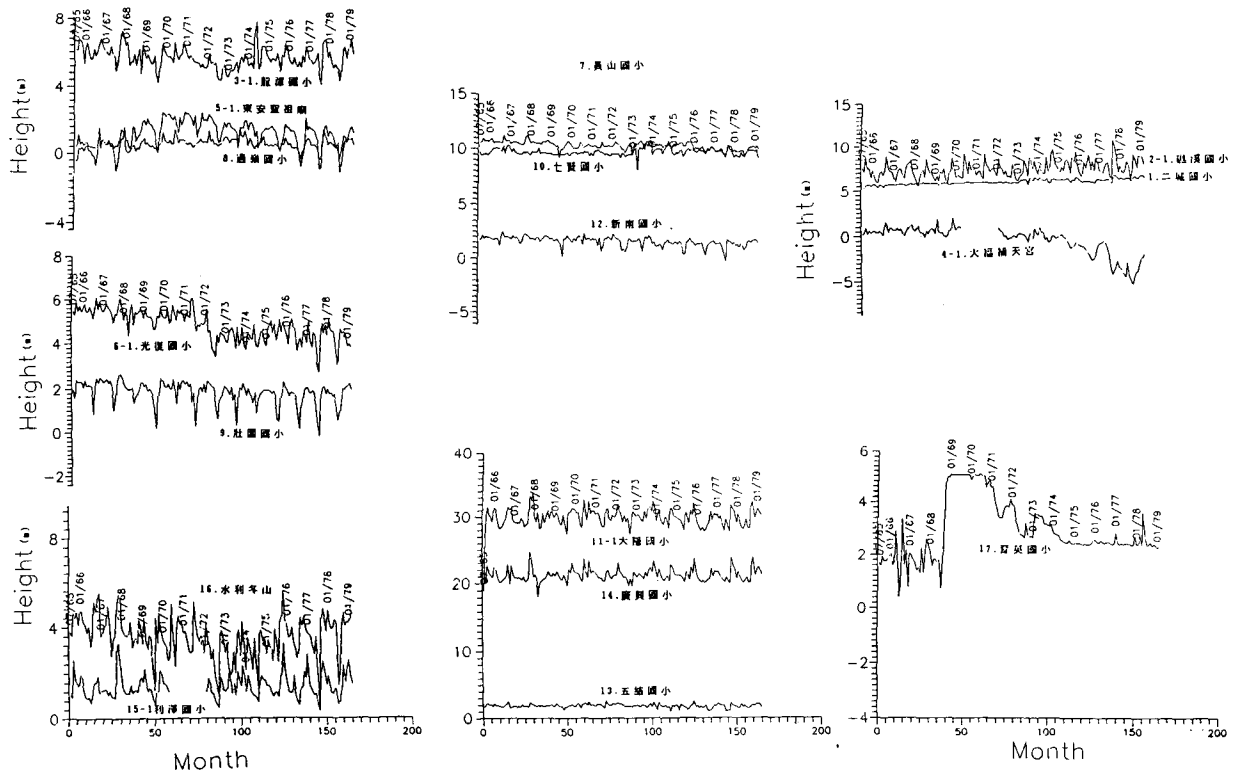


圖3. 水利局觀測井水位歷線圖

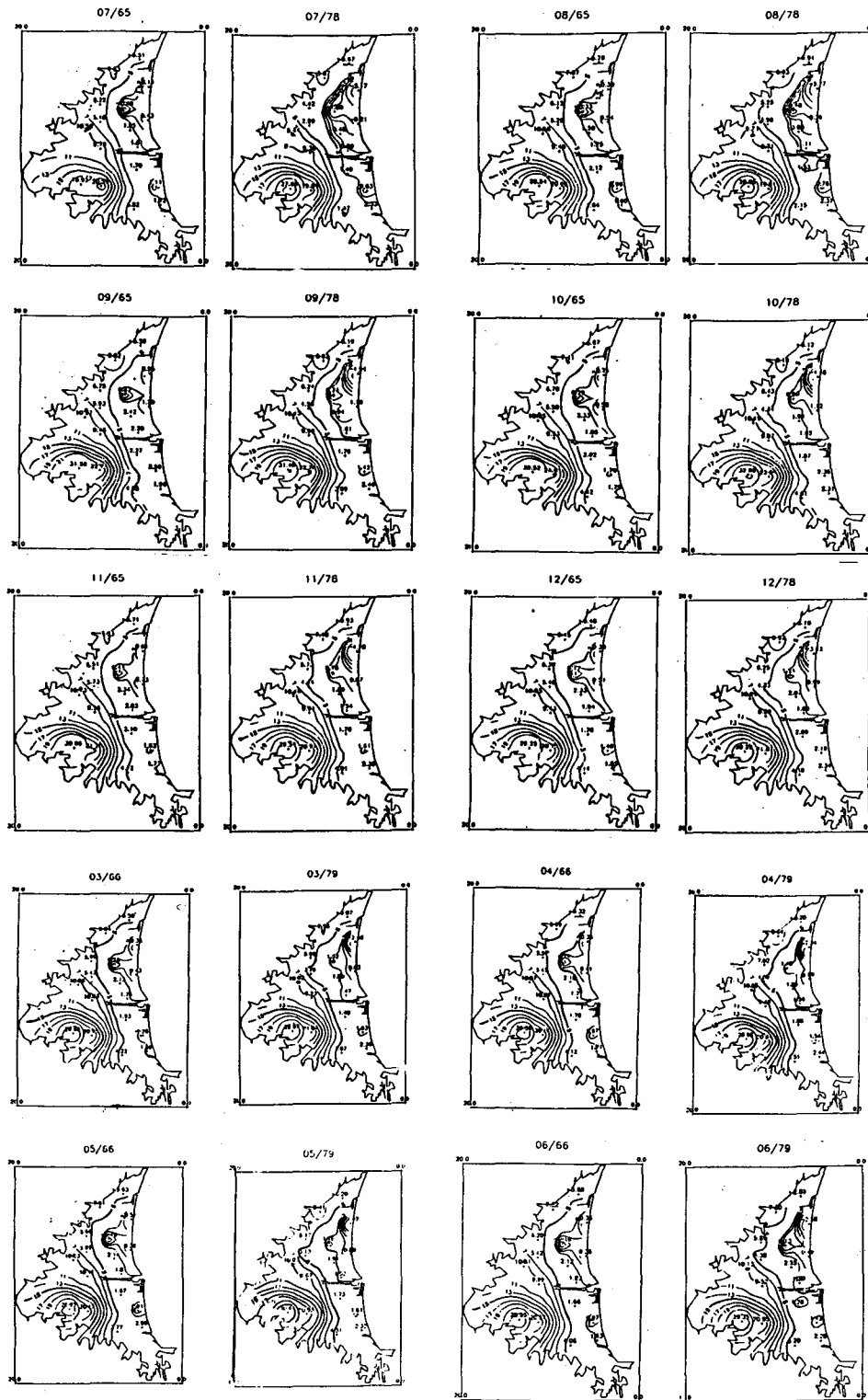


圖 4. 宜蘭地區地下水等水位線 民國65年7月~66年6月 民國78年7月~79年7月 比較圖

表1. 蘭陽地區地下水補注時間計算表

編號	日期	水位(m)	降雨量(mm)	備考		
I	77.9.14	-0.84	0	補注日數 3.0		
	15	-0.80	0			
	16	-0.75	245.0			
	17	-0.36	217.0			
	18	-0.04	153.0			
	19	-0.06	94.2			
	20	0.09	248.5			
	21	0.65	126.0			
	22	0.98	8.5			
	23	0.82	41.5			
	23	0.59	72.5			
	25	0.56	26.0			
		稽延日數	相關係數		補注日數	
		1	-0.245		3.5	
		2	-0.275			
		3	-0.595			
		4	-0.599			
		5	+0.186			
	II	9.28	0.49		26.3	
		29	0.44		116.5	
		30	0.65		338.2	
		10.1	1.21		114.5	
		2	1.73		2.5	
		3	1.51		5.4	
		4	1.32		5.0	
5		1.27	15.3			
6		1.22	5.3			
III		7	1.21	0	補注日數 2.0	
		8	1.12	1.9		
			稽延日數	相關係數		
			1	-0.252		
			2	+0.967		
			3	+0.981		
		4	+0.814			
	10.24	1.19	17.2			
	25	1.21	61.3			
	26	1.37	317.8			
	27	1.70	100.3			
	28	1.80	28.4			
	29	1.65	5.7			
	30	1.59	0.8			
	31	1.55	7.8			
11.1	1.47	17.4				
2	1.43	8.5				
3	1.42	0.2				
	稽延日數	相關係數	補注日數			
	1	0.386	2.0			
	2	0.866				
	3	0.430				
	4	0.573				

$$\text{註：相關係數}^{(1)} r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

\bar{x} ：水位平均值

\bar{y} ：雨量平均值

表2. 臺灣省水利局宜蘭縣地下水觀測井資料表

採樣井編號	採樣井名稱	採樣井地址	井管深度(m)
W- 1	二城國小	宜蘭縣頭城鎮頂埔里	50.00
W- 2 (W2-1)	礁溪國小	宜蘭縣礁溪鄉大忠村	45.00
W- 3 (W3-1)	龍潭國小	宜蘭縣礁溪鄉龍潭村	69.00
W- 4 (W4-1)	大福補天宮	宜蘭縣壯圍鄉大福村	44.55
W- 5 (W5-1)	東安聖祖廟	宜蘭縣壯圍鄉美城村	50.00
W- 6 (W6-1)	光復國小	宜蘭縣泰山路60號	46.56
W- 7	員山國小	宜蘭縣員山鄉復興路	51.00
W- 8	過嶺國小	宜蘭縣壯圍鄉過嶺村	50.00
W- 9	壯圍國小	宜蘭縣壯圍鄉吉樟村	56.00
W-10	七賢國小	宜蘭縣員山鄉七賢村	50.00
W-11 (W11-1)	大隱國小	宜蘭縣三星鄉大隱村	50.00
W-12	新南國小	宜蘭縣壯圍鄉新南村	50.00
W-13	五結國小	宜蘭縣五結鄉五結村	66.00
W-14	廣興國小	宜蘭縣冬山鄉鹿埔村	50.00
W-15 (W15-1)	利澤國小	宜蘭縣五結鄉下清村	41.70
W-16	冬山國小	宜蘭縣冬山鄉冬山路	50.00
W-17	育英國小	宜蘭縣蘇澳鎮龍德里	50.00
W-18	礁溪觀測站	宜蘭縣礁溪鄉六結路	183.00

表 3. 宜蘭地區地下水觀測井歷年最低水位變化值 (單位：公尺)

井號	井址	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	民國	最大水位數
		65.7	66.10	67.7	68.7	69.8	70.8	71.8	72.9	73.10	74.11	75.8	76.8	77.8	78.8	79.8	80.8	81.8	82.8
1	二城國小	5.51	5.70	5.68	5.73	5.71	5.81	5.75	5.59	5.88	5.98**	5.69	5.51	5.45*	5.94	6.10	0.53		
2	礁溪國小	7.63	7.43	6.34	6.38	5.79	6.68	7.48	6.27	7.21	7.89**	6.69	6.93	5.86*	6.93	8.30	2.03		
3	龍潭國小	6.22	6.80	4.93	5.24	4.29	5.59	5.43	4.41	5.46	6.37**	4.93	5.20	4.18*	5.25	5.22	2.19		
4-1	大福補天宮	0.14	0.43**	0.02	-0.18	-0.07	-	-	-0.37	-0.51	-0.45	-1.63	-3.01	-4.60	-5.77	-5.87*	6.30***		
5-1	東安廟	-0.49	0.33	-0.99	0.76	0.12	1.26	1.52	1.14	1.55	1.57**	0.22	-0.65	-0.72	-0.48*	-0.21	2.05		
6-1	光復國小	5.48	5.55**	4.93	4.82	4.64	5.04	4.53	3.99	4.14	4.51	4.42	3.94	2.67*	3.98	3.84	2.88		
7	員山國小	10.59	10.69**	10.41	10.34	9.94	10.14	10.21	9.68	10.21	10.27	9.62	9.56	9.28*	9.71	9.77	1.41		
8	過嶺分校	0.43	0.68	0.53	0.16	0.14	0.65	0.75**	0.63	1.06	0.57	0.30	-0.21	-0.23*	0.39	0.63	0.98		
9	壯圍國小	1.95	2.28**	1.02	1.34	0.19	1.30	1.26	1.43	1.92	1.91	0.45	0.13	-0.25*	0.88	1.15	2.53		
10	七賢國小	9.78	9.53	9.48	9.52	9.48	9.53	9.64	9.32	10.61**	10.27	10.27	9.76	9.45*	9.71	9.73	1.16		
11	大隱國小	-	31.10**	28.53	28.96	27.27	29.33	31.17	27.25	30.70	30.04	28.80	28.98	27.48*	28.05	28.57	3.62***		
12	新南國小	1.81	1.92**	1.36	1.52	0.19	1.33	1.10	0.64	1.77	1.46	0.51	0.30	-0.24*	1.11	1.31	2.16		
13	五結國小	1.70	1.55	1.82	1.71	1.68	1.92	2.08**	1.95	1.64	1.69	1.44	1.03	0.98*	1.53	1.83	1.10		
14	廣興國小	20.59	19.94	20.21	20.64	19.54	20.80	21.86	20.58	21.47**	21.27	20.41	20.46	19.75*	19.91	20.40	1.72		
15	利澤國小	1.11	1.59	0.96	1.14	0.66	-	-	0.48	1.43	1.72**	0.96	0.60	0.33*	0.76	1.12	1.39		
16	水利會 冬山工作站	3.82	4.72**	2.72	3.11	1.26	2.32	4.26	1.08	2.75	3.37	2.47	3.04	0.55*	2.15	2.53	4.17***		
17	育英國小	1.72	1.60	1.30	1.72	5.05**	4.93	3.69	3.21	3.11	2.41	2.36	2.46	2.39	2.37	2.28*	2.77		
18	礁溪沉陷測站								-1.78	-2.69	-1.96	0.28	0.23						民國74年 7月設立

註：*** 代表最大水位差大於3公尺

** 代表較高水位

* 代表較低水位

三、地層下陷

沖積層土壤一般均係由河川所挾帶之礫石、泥沙以及粘土等成分沉積而成，當含水層 (Acquifer) 中之地下水被超量抽取，導致水位下降，地層因所承受之有效應力增加而產生壓密 (Consolidation) 現象，使地層逐漸下陷，日後雖因獲得補注而使地下水位回升，地層終究無法回彈恢復原狀，僅能停止或減緩下陷之速率而已。此種因超抽地下水而產生之地層沉陷，通常面積甚大，而其影響亦可達土層之深部，故稱為區域性沉陷 (Regional subsidence)，或深部沉陷 (Deep subsidence)。

1. 基本原理

(1) 地下水流之微分方程式

在受壓飽和土層中，穩定層流必須滿足 Laplace 方程式⁽¹³⁾，即

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

此乃表示受壓飽和含水層中水之質量守恆原則，但若不穩定流之情況下(1)式應修改為

$$k \nabla^2 h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

式中 h：水頭高度

k：滲透係數 (Coefficient of permeability)

$s_s = s/b$ (specific storage)

s：貯水係數 (storage coefficient)

於受壓含水層中 $s = 0.00005 \sim 0.005$

於自由含水層中 $s = 0.05 \sim 0.30$

b：含水層之厚度

令 $T = bk$ ，T 稱為導水係數 (Coefficient of transmissibility)，則當水流為水平流動時

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

當水流為垂直流動時

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

本文以討論因垂直方向不穩定之流動，亦即抽水量大於補注量之情況，所產生之地層下陷為主。

(2) 土層之壓密及預壓密

當飽和土層受到壓應力作用時，由於孔隙壓力的增加，而引起孔隙水緩緩向邊界流出，孔隙比逐

漸減小，土壤體積因而逐漸縮小，此種孔隙水的排出，伴隨着體積變化的整個過程稱為壓密 (Consolidation)。地層因地下水位的下降所產生的壓密現象，每年由枯水位至豐水位，一直重覆着加壓及解壓的程序，反覆進行，但解壓的過程，孔隙比僅有小量的回復，亦即因解壓而產生之回彈極為微小，此乃由於土壤壓密主要可分成二部份，其一為土粒排列變形，其二為土粒及孔隙水之彈性變形，前者為土層壓密的主要部份，是不可逆的變化，後者雖是可逆性變化，但其量甚小。如在過去曾經受到壓應力而產生壓密現象，當外力解除後，重新再接受壓力，此類土層，稱為預壓密 (Preconsolidation) 土層^(8,11)，典型的正常壓密和預壓密作用如圖 5 所示。

該圖顯示加壓及解壓過程如下：

- (a) AB：壓應力由 p_1 增至 p_2 (加壓)
- (b) BC：壓應力由 p_2 減至 p_1 (解壓)
- (c) CD：壓應力再由 p_1 增至 p_2 (加壓)
- (d) DE：壓應力再由 p_2 增至 p_3 (加壓)
- (e) EFGH：壓應力由 p_3 減至 p_1 再由 p_1 增加至 p_4 (解壓、加壓)

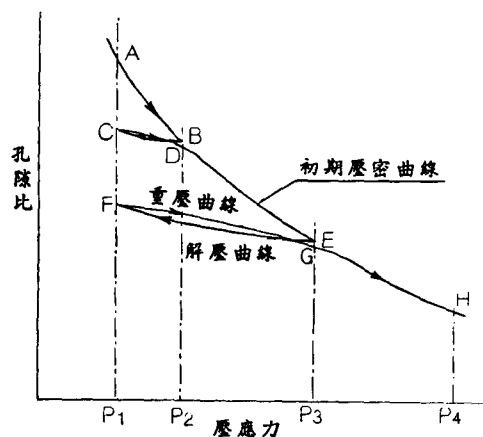


圖 5. 典型之預壓密土層加壓及解壓曲線

(3) 臺若基 (Terzaghi) 單向度壓密公式

臺若基氏於 1948 年將各種不同土壤之孔隙率 e 與土層所受的壓應力 p 之對數作成一關係曲線，即 $e \sim \log p$ 曲線，結果發現除兩端為接近水平之曲線外，在中間部份則為一接近線性關係之曲線^(9,14)，因而定義其坡度為壓縮指數 (Compression index) C_c ，以公式表之為

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} \quad (5)$$

式中 p_1 : 受壓前之壓應力
 p_2 : 加壓後之壓應力
 e_1 : 受壓前土壤之孔隙比
 e_2 : 受壓後土壤之孔隙比

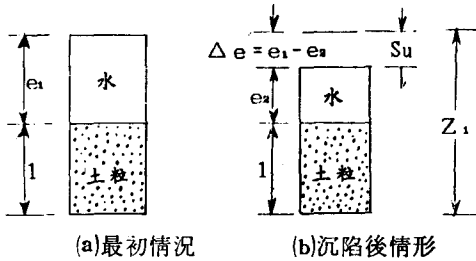


圖 6. 飽和可壓縮性土層之沉陷

由圖 6 所示土壤孔隙比與體積關係可得

$$\frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} = \frac{s_u}{z_1} \quad (6)$$

上式 s_u : 沉陷厚度

z_1 : 土層原有厚度

由 (5) 式及 (6) 式可得

$$s_u = z_1 \frac{c_c}{1 + e_1} \log \frac{p_2}{p_1} \quad (7)$$

c_c 值介於 0.1 ~ 1 之間，由於 $e \sim \log p$ 原即為近似線性關係，因而 c_c 常存有一甚大之誤差，如令公式 (7) 中之 $\frac{c_c}{1 + e_1} = c_u$ ，則可簡化計算公式即

$$s_u = z_1 c_u \log \frac{p_2}{p_1} \quad (8)$$

不同土壤之 c_u 值詳如表 4

表 4. 不同土壤之 c_u 值⁽⁴⁾

土 質	c_u
砂	0.005 ~ 0.05
粉 土	0.05 ~ 0.1
粘 土	0.1 ~ 0.3
泥 炭 土	0.2 ~ 0.8

吾人亦可由 Terzaghi 標準單向度壓密公式中之壓縮性指數 c_c 值推求土層之彈性係數 E 值，由定義

$$E = \sigma / \epsilon \quad (9)$$

$$\epsilon = s_u / z_1 \quad (10)$$

$$\sigma = p_2 - p_1 \quad (11)$$

其中 σ : 土層所受壓應力

ϵ : 土層應變

對 (9)、(10) 及 (11) 式代入 (7) 式可得

$$E = \frac{(p_2 - p_1)(1 + e_1)}{c_c \log(p_2 / p_1)} \quad (12)$$

故土壤之沉陷行為，亦可以彈性理論分析之，惟解壓後並不能恢復原狀。不同地層之彈性係數如表 5

表 5. 各種地層之彈性係數⁽⁴⁾

地 層 質 地	E 值 (kg/cm ²)
緊密之礫石與砂	2,000 ~ 10,000
緊 砂	500 ~ 2,000
鬆 砂	100 ~ 200
緊粘土及粉土	100 ~ 1,000
中粘土及粉土	50 ~ 100
緊 粘 土	10 ~ 50
泥 炭 土	1 ~ 5

地下水水位下降所增加之有效應力，可由圖 7 控制體 (Control volume) 中，力的平衡關係導得

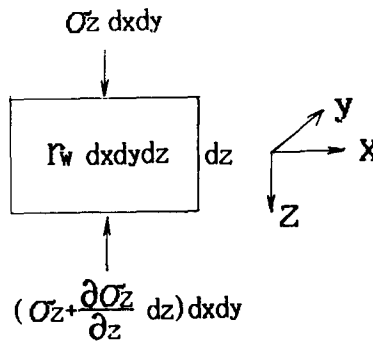


圖 7. 力之平衡關係

$$\Sigma F_z = 0$$

$$\left(\sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz \right) dx dy - \sigma_z dx dy - \gamma_w dx dy dz = 0 \quad (13)$$

將上式整理，可得

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma_w \quad (14)$$

式中 σ_z 代表在垂直方向之應力

因而，在水平方向無限延伸，地下水水位降低前

後皆為飽和之情況下，水位降低 Δh ，其所增加之有效應力 Δp 為

$$\Delta p = \gamma_w \Delta h \quad (15)$$

上式代入(8)式可得

$$s_u = z_1 c_u \log \frac{p_1 + \gamma_w \Delta h}{p_1} \quad (16)$$

即

$$s_u = z_1 c_u \log \left(1 + \frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} \right) \quad (17)$$

上式利用泰勒級數 (Taylor's series) 展開，可得

$$s_u = 0.434 z_1 c_u \left[\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} \right)^3 - \dots + (-1)^{n+1} \frac{1}{n} \left(\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} \right)^n \right] \quad (18)$$

一般而言，沖積層之 p_1 值均遠大於 $\gamma_w \Delta h$ 之值，上式級數之收斂甚為迅速，故可取至第二項，即

$$s_u = 0.434 z_1 c_u \left[\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} \right)^2 \right] \quad (19)$$

當 $\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} \leq \frac{1}{4}$ 時，如取至第一項，其誤差亦僅在 3% 以內，因而可以線性關係作為估算之依據，因而

$$s_u = 0.434 c_u z_1 \left(\frac{\gamma_w \Delta h}{p_1} \right) \quad (20)$$

$$\text{或 } \frac{s_u}{\Delta h} = 0.434 c_u \gamma_w z_1 / p_1 \quad (21)$$

亦即下陷量與水位降低之比值，可作為預測下陷量重要之指標，多層土層之沉陷量為各層沉陷量之和。

(4) 壓密速度

Terzaghi 氏由控制體 (Control volume) 面積 $dx \times dy$ ，厚度 dz 之土樣，令該土樣承受瞬時作用，總應力增加量 $\Delta \sigma$ ，推得在飽和而均質，單向 (即 dz) 排水之單向度壓密方程式為

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (22)$$

式中 c_v ：壓密係數

(Coefficient of consolidation)

u ：經過 t 時間之孔隙壓力

z ：上下方向之座標

(22) 式之邊界條件及初始條件如下：

① 粘土層之上下兩面均可完全排水，即

$z=0, z=2d$ 處 $u=0$

d 為最大排水路徑即土層厚度之半

② 初始超額靜水壓 u_1 等於作用於邊界應力之增量 $\Delta \sigma$ ，即

$t=0$ 時 $u_1 = \Delta \sigma$

令 \bar{U} 代表在厚度 $2d$ 土層中之平均壓密度，利用上述邊界條件及起始條件，Taylor 氏⁽¹⁰⁾ 導出其解為

$$\bar{U} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (23)$$

式中 $T_v = \frac{c_v t}{d^2}$ ，稱為時間因數 (Time factor)

$$M = \frac{1}{2} \pi (2m+1)$$

$$m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

上式可作成表 6 $\bar{U} \sim T_v$ 之關係表⁽¹⁴⁾，查閱甚為方便。Casagrande 氏和 Taylor 氏對(23)式提出近似解為

$$U < 60\%, \quad T_v = \frac{\pi}{4} U^2 \quad (24)$$

$$U > 60\%, \quad T_v = 1.781 - 0.933 \log (100 - U\%) \quad (25)$$

當 $U > 60\%$ ，由於(23)式級數之收斂迅速，故取 $m=0$ ，代入式中得

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} T_v\right) \quad (26)$$

整理上式亦可得 (25) 式

平均壓密度 \bar{U} 及時間因數之意義如下

$$\bar{U} = \frac{S}{S_\infty} \times 100\% \quad (27)$$

表 6. 壓密試驗對邊界條件之 T_v 與 \bar{U} 間的關係

\bar{U}	T_v	\bar{U}	T_v
0.10	0.008	0.55	0.238
0.15	0.019	0.60	0.287
0.20	0.031	0.65	0.342
0.25	0.050	0.70	0.403
0.30	0.071	0.75	0.490
0.35	0.097	0.80	0.567
0.40	0.126	0.85	0.700
0.45	0.160	0.90	0.848
0.50	0.196	0.95	1.125

$$T_v = \frac{C_v t}{d^2}$$

(28) :

式中

S：某時間已產生之沉陷量

S_∞：最後可能已產生之沉陷量

t：壓密作用時間

2.地層下陷檢測

為瞭解宜蘭沿海地區地盤下陷及評估其對於水工結構物、海堤及堤防等防洪效益之影響，臺灣省水利局自民國76年7月起在行政院農業委員會經費補助下辦理本項檢測工作，全程計畫計分四期，自民國76年7月至77年3月為第一期，77年3月至78年6月為第二期，78年6月至79年6月為第三期，79年6月至80年6月為第四期，目前已完成第三期之檢測工作，並均已編竣成果報告⁽²⁾，檢測主要路線計分二條，其一為自外澳 BM 9479 一等水準點引測，經頭城火車站（陸檢 B565）後沿臺九線省道南下，至終點蘇澳國中，全程長40.7公里，其二為引測頭城火車站（陸檢 565）水準點後沿濱海公路南下，終點與第一主測路線蘇澳國中（陸檢190）連接閉合，全程長35.75公里，主要檢測內容如下

- (1)沿臺9省道一等水準點20點
- (2)沿濱海公路一等水準點15點
- (3)地下水觀測井管頂及水準點共12口
- (4)新設水準點計12處
- (5)海堤堤頂高程15處
- (6)防潮堤頂及水工結構物20處

一等水準點各時期下陷比較圖⁽²⁾請參閱圖8（沿濱海公路）及圖9（沿九號省道），檢測平面圖，地下水位觀測井資料及第三期檢測等沉陷量線圖均請參閱圖10。

3.水位降低與沉陷量推估

地下水位由於抽水及補注，枯水位及豐水位等情況使得分析預測工作倍覺困難，因土層一直處在重覆着加壓及解壓的過程（請參閱圖11），為盡量減少預壓應力之干擾，檢討水位之時，一律取每年之最低水位，故各站取檢測前民國73年5月及6月份水位之平均值為初始水位，另沉陷觀測站成立於74年7月，取75年3月份之水位為初始水位，準此各站每年之檢討水位取7月及8月份水位之平均值。各時期水位降低及沉陷量對照表詳如表7，表8。

表7. 宜蘭地區地下水位觀測井水位降低及水準點檢測沉陷量表

井號	井址	初始水位 (m)	民國 73.6~77.3			民國 73.6~78.6			民國 73.6~79.6			備考
			檢討水位 (m)	水位降低 (m)	沉陷量 (cm)	檢討水位 (m)	水位降低 (m)	沉陷量 (cm)	檢討水位 (m)	水位降低 (m)	沉陷量 (cm)	
1	二城國小	6.08	5.61	0.47	0	5.58	0.5	3.32	5.58	0.5	3.76	
2	礁溪國小	7.88	7.86	0.07	0	6.05	1.83	4.52	6.05	1.83	4.52	
4	大福補天宮	-0.29	-2.77	2.48	1.66	-4.10	3.81	10.47	-5.47	5.18	11.75	
5	東安廟	1.41	-0.30	1.71	5.22	-0.78	2.19	10.64	-0.78	2.19	10.88	
8	過嶺分校	0.93	0.00	0.93	4.85	-0.24	1.17	15.02	-0.24	1.17	19.07	
9	壯圍國小	1.58	0.53	1.05	9.09	0.02	1.60	12.74	0.02	1.60	19.87	
12	新南國小	1.71	0.57	1.14	10.01	0.12	1.59	12.96	0.12	1.59	18.43	
13	五結國小	1.84	1.09	0.75	4.47	1.04	0.80	9.07	1.04	0.80	10.79	
15	利澤國小	1.36	0.70	0.66	0	0.51	0.85	2.80	0.51	0.85	11.28	
16	水利會 冬山工作站	2.52	2.84	-	0.53	1.28	1.24	1.33	1.28	1.24	7.50	
17	育英國小	3.46	2.46	1.00	0	2.40	1.06	5.95	2.40	1.06	5.95	
18	礁溪沉陷 觀測站	0.11	-2.22	2.33	3.28	-2.22	2.33	43.97	-2.22	2.33	43.97	

註：初始水位：民國73年5月及6月份水位平均值，沉陷觀測站為75年5月及6月水位平均值
 檢討水位：每年7月及8月份水位平均值

係參考沉陷常數 C_a 值⁽⁴⁾之範圍，根據圖12各觀測井之地質構造圖，計算各井分層沉陷量之和，與實測沉陷量比較，再決定最合理之常數 C_a 值，據以估算最大沉陷量，至於沉陷時間，由公式(28)可得

$$t = \frac{T_v \cdot d^2}{C_v} \quad (29)$$

上式可求得各不同沉陷百分比所需之時間，惟因沖積層土壤往往構造並不均勻，粘土層中間常夾有砂質層，所夾砂質層之厚度及層數均不一定，故而左右壓密時間最重要關鍵的 d 值便無法如同在實

驗室中之試樣可以準確量得，如由精密度不大的地質構造圖，據以計算沉陷時間，必然失之過大，本文藉由實測沉陷量求得單位洩降所產生之沉陷量約為 $1/7 \sim 1/44$ ，而估算最大值則約為 $1/4 \sim 1/39$ ，經推算各井完成95%最大沉陷所須之時間分別約為 $6 \sim 36$ 年，請參閱表8。各觀測井及水準點在三次檢測沉陷速率的變化情形，詳如表9~表11，數據顯示在第三期檢測中，臺9線及濱海線之沉陷速率均已減緩，臺9線並已停止沉陷，濱海線則仍在繼續中。

表8. 宜蘭地區地下水位觀測井單位洩降沉陷量暨壓密時間估算表 (民國73.6~79.6)

井號	分層	土質	厚度(m)	C_a 值(估算)	水位降低(m)	估算分層沉陷量(cm)	實測沉陷量(cm)	沉陷量/水位洩降		壓密度估算值	完成95%壓密時間估算(年)
								實測值	估算最大值		
1	1	粘土	21	0.13~0.26	0.5	3.75~7.50					
	2	細砂	29	0.01~0.03	0.5	0.10~0.30					
	合計					3.85~7.80	3.76	1/13.3	1/6.4	0.48	30.9
2	1	砂礫土	13	0	1.83	0					
	2	細砂坩土	32	0.05~0.10	1.83	2.33~4.66					
	合計					2.33~4.66	4.52	1/40.5	1/39.3	0.97	6.0
4	1	細砂坩土	43	0.03~0.06	5.18	11.36~22.72					
	合計					11.36~22.72	11.75	1/44.1	1/22.8	0.52	31.7
5	1	粘土	45	0.07~0.13	2.19	11.30~22.60					
	2	細砂	5	0.01~0.03	2.19	0.06~0.18					
	合計					11.36~22.78	10.88	1/20.1	1/9.6	0.48	30.9
9	1	粘土	57	0.15~0.30	1.56	19.29~38.58					
	合計					19.29~38.58	19.87	1/7.9	1/4.0	0.52	31.7
12	1	粘土	24	0.17~0.30	1.59	19.16~34.59					
	2	砂礫土	10	0	1.59	0					
	3	細砂	16	0.01~0.03	1.59	0.16~0.48					
	合計					19.32~35.07	18.43	1/8.6	1/4.5	0.53	30.5
13	1	細砂坩土	12	0.05~0.10	0.80	2.67~5.33					
	2	粘土	24	0.25~0.30	0.80	4.27~5.12					
	3	細砂	14	0.01~0.03	0.80	0.06~0.18					
	4	粘土	13	0.25~0.30	0.80	1.06~1.43					
	5	砂礫土	6	0	0.80	0					
	合計					8.06~12.06	10.79	1/7.4	1/6.6	0.90	8.0

16	1	粘 土	21	0.11~0.22	1.24	7.65~15.30					
	2	砂礫土	20	0	1.24	0					
	合計					7.65~15.30	7.5	1/16.2	1/8.1	0.49	35.8
17	1	砂礫土	17	0	1.06	0					
	2	細砂坩土	33	0.10~0.15	1.06	2.40~3.60					
	合計					2.40~3.60	5.95	1/17.8	1/17.8	已停止 沉陷	6
18	1	粘 土	20	0.25~0.30	2.33	29.90~35.88					
	2	細 砂	40	0.02~0.03	2.33	0.79~1.19					
	3	粘 土	3	0.25~0.30	2.33	0.61~0.73					
	4	細 砂	47	0.02~0.03	2.33	0.45~0.68					
	5	粘 土	5	0.25~0.30	2.33	0.55~0.66					
	6	細 砂	13	0.02~0.03	2.33	0.08~0.12					
	7	粘 土	50	0.25~0.30	2.33	4.15~4.98					
	8	礫 石	5	0	2.33	0					
	合計					36.53~44.24	43.97	1/5.3	1/5.3	已停止 沉陷	6

表9. 宜蘭地區地下水觀測井水準點沉陷速率 (公分/月)

井號	井 址	民 國 73.6~77.3	民 國 77.3~78.6	民 國 78.6~79.6	沉陷速率變化情形		目前沉陷 速率序別
					繼 續 中	已 減 緩	
1	二 城 國 小	0	0.40	0.04		✓	
2	礁 溪 國 小	0	0.41	0		✓	
4	大 福 補 天 宮	0.01	0.85	0.01		✓	
5	東 安 廟	0.12	0.35	0.02		✓	
8	過 嶺 分 校	0.11	0.68	0.34		✓	5
9	壯 圍 國 小	0.20	0.24	0.59	✓		2
12	新 南 國 小	0.22	0.20	0.46	✓		4
13	五 結 國 小	0.10	0.31	0.14		✓	6
15	利 澤 國 小	0	0.24	0.71	✓		1
16	冬 山 工 作 站	0.01	0.05	0.51	✓		3
17	育 英 國 小	0	0.65	0		✓	
18	礁溪沉陷觀測站	1.00	0.78	0		✓	民國74年 7月設立

表10. 宜蘭沿海地區一等水準點沉陷速率 (沿濱海公路)

單位：公分/月

編號	位 置	民 國 73.6~77.3	民 國 77.3~78.6	民 國 78.6~79.6	沉陷速率變化情形		日前沉陷 速率序別
					繼 續 中	已 減 緩	
陸 564	竹 安 橋	0.08	0.46	0.17		✓	
陸 563	竹 安 橋	0	0.42	0.18		✓	5
陸 562	大 福 路	0.04	0.59	0.11		✓	
陸 560	永 鎮 路	0.10	0.71	0.30		✓	2
陸 559	振 安 廟	0.12	0.70	0.34		✓	1
內 504	興 蘭 大 橋	0	0.71	0.15		✓	
陸 556	利 澤 大 橋	0.15	0.68	0.12		✓	
陸 555	新 秀 路	0	0.48	0.30		✓	3
陸 554	利 澤 村	0	0.44	0.23		✓	4
陸 553	蘇 澳 區 界	0	0.34	0.16		✓	
陸 501	龍 德 大 橋	0	0	0.14	✓		
陸 551	隘 丁	0	0.15	0.09		✓	
陸 500	檢 修 組	0	0	0		✓	

表11. 宜蘭沿海地區一等水準點沉陷速率 (沿9號省道公路)

單位：公分/月

編號	位 置	民 國 73.6~77.3	民 國 77.3~78.6	民 國 78.6~79.6	沉陷速率變化情形		備 考
					繼 續 中	已 減 緩	
陸 565	頭 城 車 站	0	0	0			
內 218	頂 埔	0	0.16	0.04		✓	
9483	二 城	0	0.20	0.03		✓	
陸 195	礁 溪 國 中	0	0.42	0		✓	
內 217	白 鵝 村	0	0.44	0		✓	
內 216	吳 沙 路	0	0.53	0		✓	
9488	力 行 國 小	0	0.61	0		✓	
內 213	縣 黨 部	0	0.90	0		✓	
9490	凱 旋 路	0	0.87	0		✓	
陸 193	二 結	0	1.06	0		✓	
內 212	四 結	0.12	1.02	0		✓	
內212-A	八 仙 橋	0	1.09	0		✓	
內 210	五 結 鄉 公 所	0	0.67	0		✓	

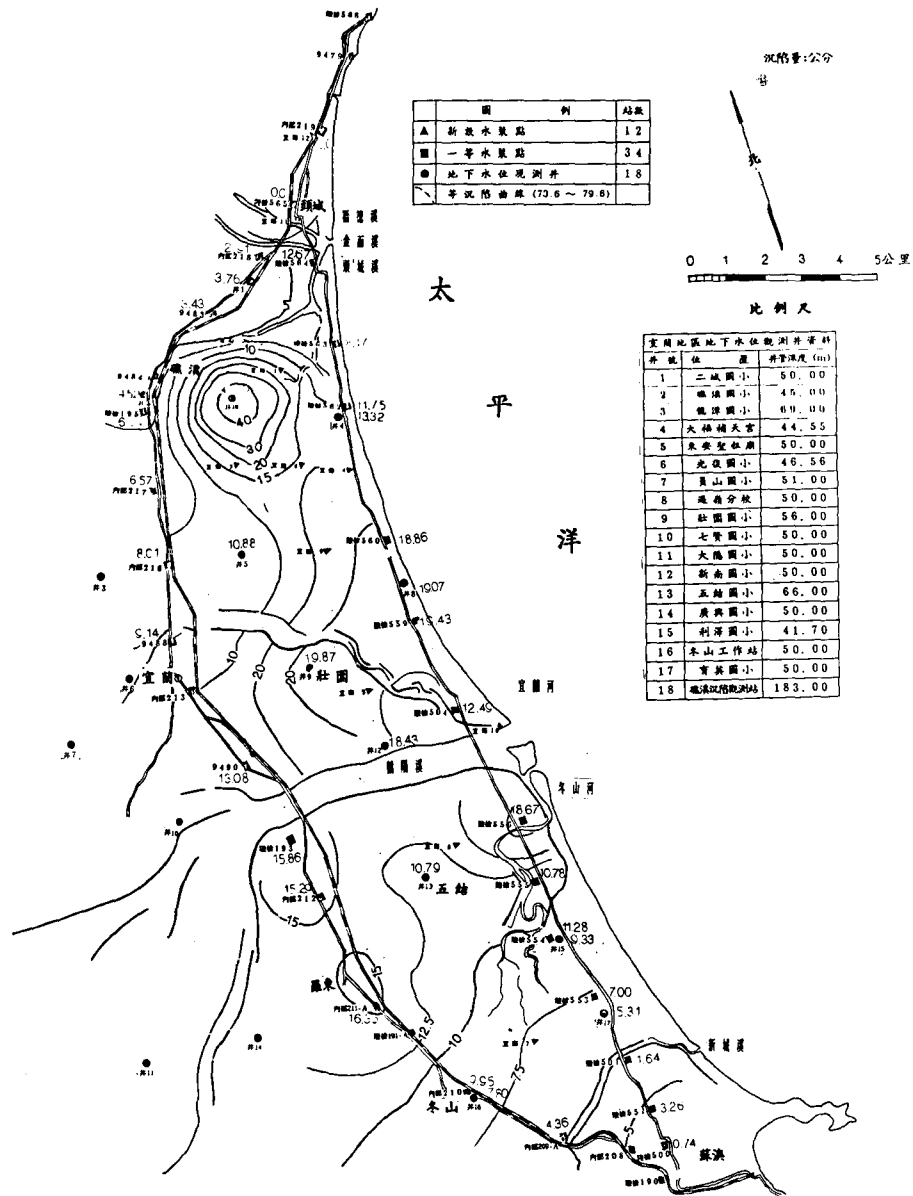
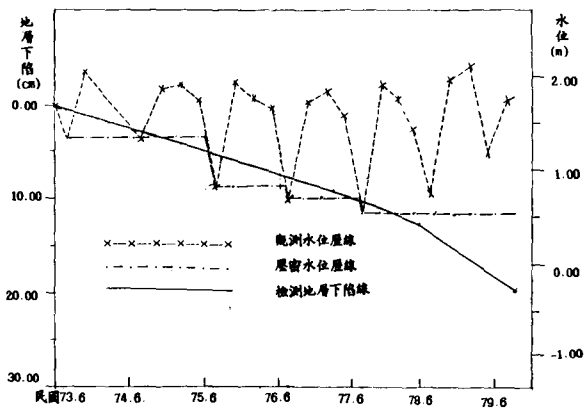


圖10. 宜蘭沿海地區地盤下陷檢測平面圖



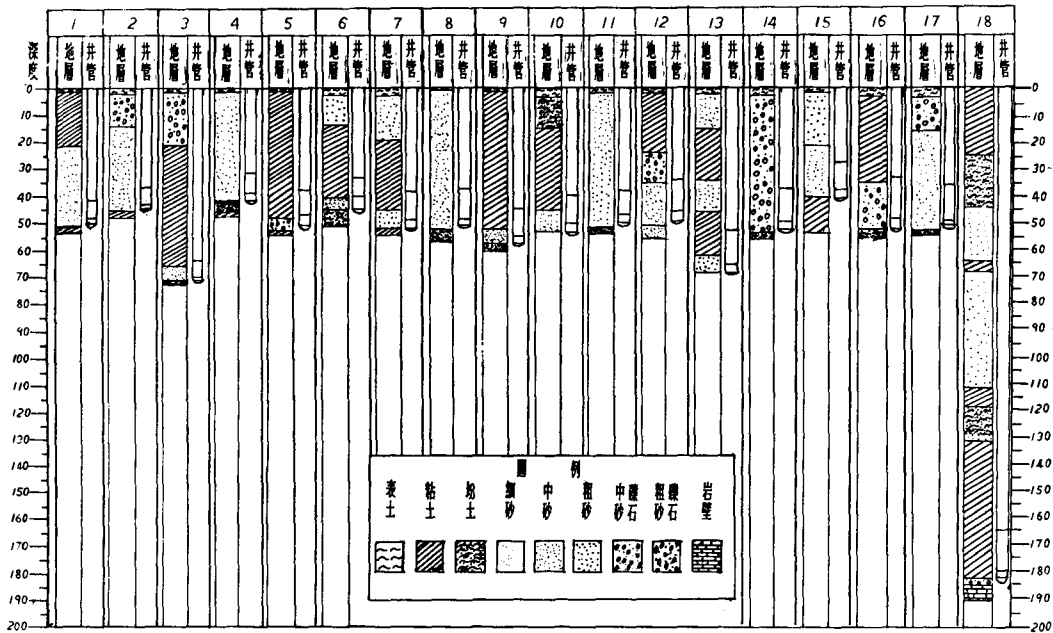


圖12. 宜蘭地區觀測井地質構造圖

四、海水入侵與水質劣化

沿海地區地下水層淡水與海水之交界面 (Interface), 係位於海平面下約等於該處地下水位在海平面上高度的四十倍, 當補注量等於抽水量時, 該交界面之位置可維持不變, 倘抽水量大於補注量時, 該交界面便向內陸推進, 造成海水入侵地下水層, 並使地下水之水質劣化, 受海水污染後, 水質便不再合乎標的用水之標準, 甚至完全喪失含水層之供水機能。

1. 基本原理

(1) 吉本—海茲培格 (Ghyben-Herzberg) 現象淡水與海水之交界面, 存在於海平面下淡水水面高出海平面距離之40倍, 此一現象首先由吉本氏 (Ghyben) 發現^(12, 15), 並由海茲培格氏 (Herzberg) 於1901年應用於給水工程, 因而稱之為吉本—海茲培格現象。

由圖13所示一非限制含水層 (Unconfined aquifer) 液面A在海水處之靜水壓力為

$$p_A = \gamma_s h_s \quad (30)$$

液面A在淡水處之靜水壓力為

$$p_A = \gamma_f h_f + \gamma_f h_s \quad (31)$$

在交界面淡水與海水之靜水壓力平衡因而得

$$h_s = \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \right) h_f = \delta h_f \quad (32)$$

上式中

γ_s : 海水之單位重量

γ_f : 淡水之單位重量

h_f : 淡水高出海平面之距離

h_s : 液面A至海平面之距離

$$\delta = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}$$

如取 $\gamma_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$,

則 $\delta = 40$, 即 $h_s = 40 h_f$

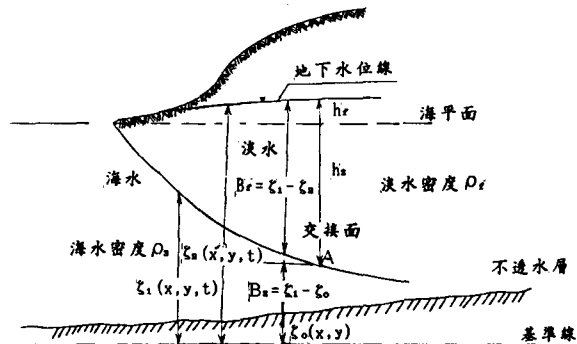


圖13. 吉本—海茲培格淡水與海水關係圖

吉本—海茲培格現象亦可適用於限制含水層 (Confined aquifer)，此情況 h_r 應為壓力計液面高出海平面之距離。

(2) 微分方程式

為簡化複雜之物理條件及降低水流系統之維度，使數學分析之運算簡化，其重要之假設如下：

① 杜布假設 (Dupuit Assumption) 1863 年杜布氏對處理自由含水層之水流問題作下列二個假設：(a) 水流為水平流，等勢能線為垂直線 (b) 水力坡降等於自由水面之坡度，且不隨深度而改變。

② 含水層具均質 (Homogeneous) 及等向性 (Isotropic)。

③ 海水與淡水之交界面明顯而無擴混現象 (Dispersion)。

④ 補注水量垂直向下直達地下水面。

⑤ 不考慮淡水出口。

如圖14, R_1 及 R_2 分別代表淡水與海水之定義域

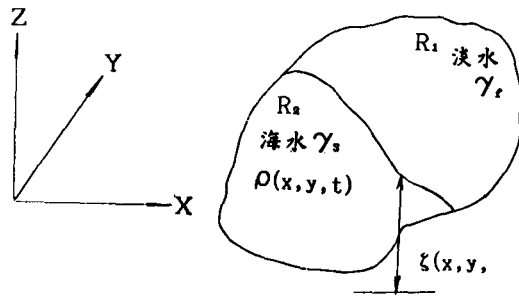


圖14. 淡水與海水之定義域

由基本假設及定義域，對於不同之補注量、抽水量、邊界水流條件以及含水層特性因子等情況，各節點之水頭值可利用有限元素法，聯立解如下兩方程式而求得

$$\nabla' \cdot (B_s K_s \nabla' \bar{\phi}_s) - n(1+\delta) \frac{\partial \bar{\phi}_s}{\partial t} + n\delta \frac{\partial \bar{\phi}_r}{\partial t} - p_s(x, y, t) = 0 \quad (33)$$

$$\nabla' \cdot (B_r K_r' \nabla' \bar{\phi}_r) + n(1+\delta) \frac{\partial \bar{\phi}_s}{\partial t} - n(1+\delta) \frac{\partial \bar{\phi}_r}{\partial t} + R - p_r(x, y, t) = 0 \quad (34)$$

其中

$$\nabla' = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}$$

$$K_r' = K_r \vec{i} + K_r \vec{j}$$

$$K_s' = K_s \vec{i} + K_s \vec{j}$$

K_s ：海水之水力傳導係數

K_r ：淡水之水力傳導係數

$$\bar{\phi}_s = \frac{1}{B_s} \int_{\zeta_0}^{\zeta_1} \phi_s dz$$

$$\bar{\phi}_r = \frac{1}{B_r} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \phi_r dz$$

ζ_1 ：交界面至基準線之距離

ζ_2 ：地下水面至基準線之距離

ζ_0 ：不透水層至基準線之距離

B_s ： $\zeta_1 - \zeta_0$

B_r ： $\zeta_2 - \zeta_1$

ϕ_s ：觀測井海水之管壓水頭

ϕ_r ：觀測井淡水之管壓水頭

n ：介質之孔隙率

R ：地表天然補注量

$p_s(x, y, t)$ ：海水區抽水井之抽水量

$p_r(x, y, t)$ ：淡水區抽水井之抽水量

同時，另依下列兩方程式便可求得自由水面與交界面之形狀及變化情形

$$\zeta_1 = (1+\delta) \bar{\phi} - \delta \bar{\phi}_r \quad (35)$$

$$\zeta_2 = \bar{\phi}_r \quad (36)$$

根據上列地下水微分方程式，國內外已發展許多不同數學模式可作為海水入侵問題分析參考之用，農業工程研究中心曾在國科會、臺灣省水利局及雲林農田水利會等機構補助下於民國71年建立「雲林地區地下水數學模式」⁽⁶⁾及「雲林地區地下水海水入侵模式」⁽⁷⁾，並經與其他數學模式及 Helshaw Model 實驗印證，頗為相近。

2. 水質檢測

為充份瞭解並掌握本地區地下水含水層水質之狀況及動態，臺灣省環保處於民國79年7月起委托國立宜蘭農工專科學校，進行本地區水質之全面檢測，為期一年，利用臺灣省水利局宜蘭地區之18口地下水水位觀測井及附近民井，採樣分析，其項目如下：

- | | | | | |
|-------|-------|----------|------|------|
| ① 水溫 | ② pH值 | ③ 電導度 | ④ 鹼度 | ⑤ 氯鹽 |
| ⑥ 硫酸鹽 | ⑦ 硬度 | ⑧ 錳 | ⑨ 鈣 | ⑩ 銅 |
| ⑪ 鉻 | ⑫ 鋇 | ⑬ 神 | ⑭ 鎂 | ⑮ 鋅 |
| ⑯ 鈉 | ⑰ 鉀 | ⑱ T.D.S. | ⑲ 鐵 | |

有關海水入侵之相關數據分析詳如表12

表12. 宜蘭地區地下水位觀測井水質檢測值

井號	日期 民國 79年	檢 驗 項 目			
		E. C. (Umhos/cm)	Cl (mg/l)	T.D.S. (mg/l)	Na mg/l
1	9.20	483	8.71	283	124.0
	10.20	491	10.49	388	122.0
	12.26	436	9.40	270	
2	9.20	314	8.39	175	73.0
	10.20	342	9.44	198	71.0
	12.26	307	8.40	125	
3	9.20	220	7.14	124	19.0
	10.20	221	7.35	112	20.0
	12.26	196	6.30	110	
** 4	9.20	5800	1778.81	4440	1055.0
	10.20	6040	1836.31	4650	1097.5
	12.26	5470	—	4000	
5	9.20	390	13.64	232	45.0
	10.20	373	14.69	214	46.0
	12.26	334	14.70	160	
6	9.20	268	61.91	154	42.0
	10.20	280	65.58	165	61.0
	12.26	240	53.50	160	
7	9.20	109	6.30	63	26.5
	10.20	111	9.97	62	260.0
	12.26	101	13.60	110	
8	9.20	161	17.84	97	29.0
	10.20	170	26.76	98	28.0
	12.26	156	28.30	220	
9	9.20	368	5.25	205	63.0
	10.20	363	6.82	212	64.5
	12.26	328	5.20	200	
10	9.20	360	2.10	208	20.5
	10.20	338	4.72	208	68.5
	12.26	299	6.30	195	

11	9.20	174	5.77	108	14.5
	10.20	170	5.77	98	12.5
	12.26	610	5.20	100	
12	9.20	444	5.25	258	46.5
	10.20	445	5.25	255	51.5
	12.26	394	4.00	255	
13	9.20	644	4.72	453	148.0
	10.20	720	5.25	—	136.0
	12.26	670	3.10	475	
14	9.20	81	9.97	58	13.5
	10.20	86	11.54	42	12.0
	12.26	74	9.40	152	
15	9.20	142	20.46	101	21.5
	10.20	162	9.44	101	20.5
	12.26	104	19.90	95	
16	9.20	391	20.46	264	90.5
	10.20	406	31.48	239	89.0
	12.26	359	22.00	145	
**17	9.20	12654	4270.84	7500	2975.0
	10.20	14240	4459.61	—	3200.0
	12.26	9530	4208.00	6300	
**18	9.20	1848	569.78	1400	380.0
	10.20	—	—	1420	442.5
	12.26	2170	955.00	1980	

註：①**表示已有海水入侵跡象之觀測井

②12月26日鈉離子濃度因儀器送修而未檢測

臺灣省自來水水質標準上限，氯濃度為250mg/l，固溶物總量(T.D.S.)為800mg/l。依此標準檢討各井之二者與標準值之比，4號井分別為7倍及6倍，17號井為17倍及8倍，18號井為2倍及3倍，其餘14口井均未超過上限。

3. 海水入侵數據分析

由表12水質檢測結果，顯示4號、17號及18號等三口井水質不佳，且有海水入侵之跡象，茲將相關數據分析，詳如表13。另臺灣省政府為建立本省

表13. 宜蘭地區海水入侵跡象觀測井相關數據分析表

編號	井 址	日期 民國79年	氯 (mg/l)	鈉 (mg/l)	氯含量與 海水之比 (%)	鈉含量與 海水之比 (%)	與海岸線 距離(m)	井管深度 (m)	嚴重程度 排 序
4 (大福宮)	壯圍鄉大福村	9.20	1778.81	1055	9.36	10.05	500	44.6	2
		10.20	1836.31	1097.5	9.66	10.45			
		12.26	—	—	—	—			
17 (育英國小)	蘇澳鎮龍德里	9.20	4270.84	2975	22.48	28.33	1400	50.0	1
		10.20	4459.61	3200	23.47	30.48			
		12.26	4208.00	—	22.15	—			
18 (礁溪沉陷 觀測站)	礁溪六結路	9.20	569.78	380	3.00	3.62	3100	183.0	3
		10.20	—	442.5	—	4.21			
		12.26	955.00	—	5.03	—			

註：海水中氯濃度19,000mg/l

海水中鈉濃度10,500mg/l

表14. 宜蘭地區海水入侵跡象民用抽水井相關數據分析表

編號	井址	檢測日期	氯濃度 mg/l	氯含量與海水 氯濃度比值 (%)	井深 (m)	馬力	備考
GM1	頭城鎮竹安里 打馬路	民國70.1	598	3.15	12	1	目前已停用
		5	981	5.16			
		9	1610	8.47			
		71.1	1210	6.37			
		5	2320	12.21			
9	2150	11.32					
GM2	壯圍鄉大福村 大福路	70.1	118	0.62	16	1/4	目前已停用
		5	383	2.02			
		9	799	4.21			
		71.1	708	3.73			
		5	713	3.75			
9	756	3.98					
GM5	五結鄉季水村 季水路	70.1	198	1.05	12	3	目前尚使用
		5	718	3.78			
		9	510	2.68			
		71.1	430	2.26			
		5	507	2.67			
		9	400	2.11			
		77.1	187	1.97			
		5	—	—			
		9	3060	32.21			
		78.1	2970	31.26			
5	2539	26.73					
9	—	—					

地下水水質長期資料，自民國69年起辦理地下水水質取樣及檢驗工作，並自民國70年起編印「臺灣地下水水質年報」⁽³⁾，宜蘭地區之採樣抽水井共9口，由年報資料分析，具有海水入侵跡象者共3口，其中2口目前已停用，僅編號5之井，目前尚使用中，但其水質自77年9月起含鹽成分甚高，本項相關數據分析，詳如表14。

五、結 論

1. 資料顯示，本區在辦理地盤下陷檢測（73年6月）之前，即有部份地區發生嚴重沉陷，例如，宜蘭市力行國小9488水準點於民國73年6月之前沉陷量達33.42公分，73年6月之後9.14公分，合計為42.6公分，又如宜蘭市凱旋路9490水準點，在民國73年6月之前沉陷量達36.63公分，73年6月之後13.08公分，合計49.7公分，顯示局部地區，特定時段內因補注量不足所導致局部沉陷之情況。另竹安防潮堤（左）2+000處，完工於民國16年，設計高程4.00公尺，於77年3月檢測堤頂高程僅2.5319公尺，而（左）2+900處，於77年3月堤頂高程亦僅3.4309公尺，該二處高程

不足之原因是否由於地盤下陷抑或部份由於地盤下陷，或者另由其他因素所造成，則有待探討。

2. 就平原地區而言，自民國73年6月至79年6月六年間平均下陷約10.0公分，下陷較明顯地點為利澤大橋（陸檢556）18.6公分，壯圍鄉振安廟（陸檢559）19.4公分，永鎮（陸檢560）18.8公分。77年3月（一期）至79年6月（三期）二年間平均下陷約為9.0公分。

3. 大量超抽地下水，無疑的是造成地盤下陷的主要原因，本區內現有養殖面積計1974公頃，政府除應管制既有養殖用地之擴張，禁止新設養殖用地之外，亟宜大幅編列預算，增加公共投資，為養殖業者提供替代水源，本區五結海水抽水站已於民國79年6月啟用，大塭海水抽水站則預定80年6月運轉，往後當可解決部份地盤下陷問題，惟應嚴防海水污染附近農田。

4. 觀測井採樣送驗發現井4（壯圍鄉大福宮）、井17（蘇澳鎮育英國小）、井18（礁溪沉陷站）3口井，氯鹽含量與海水中氯濃度之比值依序約為9.5%、23%及4%，顯示交界面之此部已入侵至該3口井井管深度之內。另臺灣省環保處在

GM5 民井（五結鄉季水村）所採水樣 77年 1 月前該濃度假比僅 2.5%左右，同年 9 月，其比值突然上昇至 32.21%，情況極為嚴重，該井深度僅 12m，究係受到魚塭用水滲漏污染或已受到海水入侵之影響，尚待進一步分析。

5. 根據臺灣省水利局第三次地盤下陷檢測成果報告分析，本期沿臺省九號道路已停止沉陷，沿濱海線各點之沉陷速率雖均已減緩，但仍有陸 559、陸 560 及陸 555 三處水準點每月平均之沉陷速率超過 0.3 公分，而觀測井水準點則有井 15（利澤國小）、井 9（壯圍國小）、井 16（水利會冬山工作站）、井 12（新南國小）及井 8（過嶺分校）等五處每月平均沉陷率超過 0.3 公分，井 15 更高達每月 0.71 公分，值得特別注意。

6. 由觀測井水位降低值用以預測單位洩降所產生的沉陷值，在沖積土層中，兩者關係約略成爲線性關係，本文採用歷年最低水位值之差作爲洩降，以扣除預壓密情況，經分析，實測值約爲 1/7~1/44，估算最大值約爲 1/4~1/39，推算完成 95% 最大沉陷所須之時間爲 6~36 年，故以目前情況，如水位不穩定回升，則大部份地點尚會繼續沉陷。

7. 蘭陽平原三面環山，東臨太平洋，先天之地理條件極容易造成含水層周圍污染物質的快速集中，如再加上超抽地下水而導致海水入侵，交界面向內陸挺進，污染物更將無法排放。

8. 蘭陽地區目前尚無水庫可資蓄水利用，因此在地下水資源方面，不論是質的提昇，量的開發，以及因過度開發地下水所衍生的地盤下陷、海水入侵等不良問題，均宜未雨綢繆，及早謀求因應之良策。

誌 謝

本文研究期間，承曹師以松、吳師建民惠予指導，臺灣省環保處提供地下水污染調查委託計畫，行政院農業委員會林技正永德以及臺灣省水利局第一工程處陳課長生提供寶貴意見與資料，本校歐明謙先生等同仁熱心協助，均此一併誌謝。

參 考 文 獻

1. 王如意，易任（民國 76 年），「應用水文學（下冊）」，茂昌書局。
2. 臺灣省水利局，「宜蘭沿海地區地盤下陷檢測成果報告」，民國 77 年 3 月（一期）、78 年 6 月（

二期）、79 年 6 月（三期）。

3. 臺灣省政府環境保護處，「臺灣省地下水水質年報」，民國 70 年~78 年。
4. 李似椿、曹以松（民國 78 年），「地下水」，中國土木水利工程學會。
5. 吳建民、張秉權（民國 78 年 9 月），「臺灣地區之地下水資源」，水文地質研討會論文專集，P. 37~P. 68，經濟部中央地質調查所。
6. 曹以松、柯海生、林俊男、陳京合（民國 71 年 3 月），「雲林地區地下水數學模式之研究」，P. 1~P. 160，農業工程研究中心研究報告。
7. 曹以松、蔡振源、沈宗華（民國 71 年 10 月），「雲林地區地下水海水入侵模式之研究」，P. 1~P. 103，農業工程研究中心研究報告。
8. Das, Braja M. (1976): "Advanced Soil Mechanics", Mc Graw-Hill International Book Company.
9. Helm, Donald C. (1975): "One-Dimensional Simulation of Aquifer System Compaction Near Pixley, California 1. Constant Parameters", Vol. 11, No. 3, P. 465~P. 479.
10. Holtz, Robert D. and Kovacs, William D. (1981): "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
11. Holzer, Thomas L. (1981): "Preconsolidation Strees of Aquifer Systems in Area of Induced Land Subsidence", Water Resources Research, Vol. 17, No. 3, PP. 693~704.
12. Ismail Kashef, Abdel-Aziz (1986): "Groundwater Engineering", Mc Graw-Hill International Book Company.
13. Poland, Joseph F. (1984): "Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal", Prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8. 4.
14. Scott, C. R. (1977): "An Introduction to Soil Mechanics and Foundation", 2nd ed. Applied Science Publishers.
15. Todd, David Keith (1980): "Groundwater Hydrology", 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc.

收稿日期：民國 80 年 2 月 7 日

修正日期：民國 80 年 2 月 19 日

接受日期：民國 80 年 3 月 4 日