

# 臺灣省粘質水田土壤之乾燥收縮與龜裂之研究

## The Cracking and Shrinking Properties of the Clayey Paddy Soils in Taiwan

千 田 勝 己\*      徐 五 標\*\*

### Abstract

In the case of the mechanized farming, it is important to accelerate the drying of the clayey paddy field soil after drainage of residual water and to increase its trafficability. In such case, it is especially required to increase the evaporation of soil moisture from the ground surface, the effect of cracks on promoting the evaporation was chosen for this study.

The method of this study is mentioned as under; The cracks were formed either as the result of natural shrinkage or artificially by cutting through the sample. Tests were made in the laboratory, greenhouse and in the fields for comparison. Changes in soil moisture content was followed by tensiometers and gypsum blocks buried at various depths. The number and size of cracks were registered periodically. The rates of evaporation from the soils with varying degree of cracking were compared with that of the soil Atomometer.

By the experiment both in the field and laboratory, I got the following results:

#### A. Laboratory Experiment

1. When the samples are dried up only on the upper surface, its drying characteristics is divided in to three stages.
2. When cracks developed, the rate of evaporation was enhanced and showed no marked discontinuity in the drying curve.
3. The rate of evaporation was markedly increased when the cracks were wider than about 1 cm.

#### B. Lysimeter Test in the Laboratory

1. Upper soil dried in accord with the previous test. Lower soil began to dry only after the upper soil dried beyond PF 2.0.
2. Cracks wider than 1 cm markedly increased the evaporation rate corresponding to more than doubling the soil surface area.
3. There seems to be a relation between the total water loss from soil and the maximum width of cracks developed.

#### C. Nature of the crack

1. In the semi-homogenized clayey paddy field soil where puddling was carried out, the cracks occur under much moistend condition (PF 1.5-PF 1.7). But these cracks did not extend so much. As the soil moisture decreased to PF 1.8-PF 2.0, new cracks occurred in the lysimeter clay, and developed rapidly.
2. As the development of the length of cracks was so rapid, they reached final dimensions within two days after drainage of the residual water. As for the width of cracks, though it had a parabolic relation with elapsed time, it extended rather slowly. The depth of crack increased linearly with its width. The dimensions of cracks may be represented by its width.
3. The amount of cracks on the clayey soils may be represented by the width of the largest crack.

\* 臺灣大學農業工程研究所，現臺灣大學農業化學系

\*\* 臺灣大學農業工程系副教授

#### D. Evaporation in the crack

1. Evaporation in the crack remarkably decreased with depth. And there was linear relation between evaporation and the saturation deficit of the air in the crack.
2. Under the same environmental condition, there was a parabolic relation between the saturation deficit and the ratio of the width to the depth of the crack.
3. Due to the differences of the saturation deficit in the crack, water vapor diffusion occurred and caused the drying of deep place. Thus, these cracks are useful for the drying of clayey paddy field.

### 壹、引 言

日本之年降雨量遠超過 1,000mm，而稻作期間之雨量為 600-1,000mm，但是若此期間之雨量不足常年之 45% 時，即發生所謂之旱害<sup>(1,2,3)</sup>。

目前，日本之各種氣象災害中，旱害僅次於風水害，冷害而居第三位<sup>(1,4,5)</sup>。隨著旱害之發生，水田田面即有種種複雜之龜裂現象，其程度依土壤之粘性而增大<sup>(6)</sup>。臺灣水田旱害時，田面上產生許多之龜裂，往往比日本更甚。為此，亦是本研究基本動機之一。

龜裂乃是由於土壤之粘着性，土壤含水量，以及導致土壤乾燥之氣象要素等之作用而引起<sup>(6)</sup>。由於土壤經過長期之乾燥收縮之結果，產生深層龜裂，有利於排水；相反地，亦會切斷土壤作物之根系，引起水分消失之不良影響<sup>(6,7,8,9)</sup>。

本研究目的為明瞭乾燥過程對粘質水田土壤所產生收縮與龜裂之情況，及對灌溉排水和土壤管理上之影響。粘質水田土壤由於乾燥而發生的物理現象過程為：

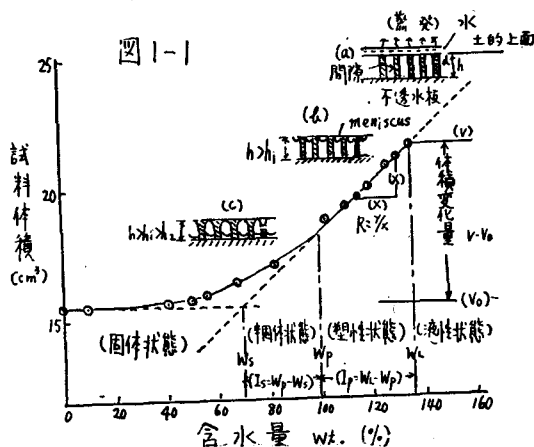
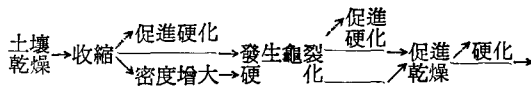


圖 1. 土壤之體積與含水量的關係

因此本研究着重土壤物理性方面之探討，由於乾燥而發生一連串之土壤變動，是否有何關連性是本研究進行之步驟。

有關農業機械化，粘質水田土壤之排水後，除取在土壤裡殘餘之水分而增加乾燥之速度，以增加土壤之 trafficability。目前，這問題是非常重要的。在水田裡，這種例子特別要求增加從土壤表面之水分蒸發。明知龜裂助長乾燥，因此，龜裂之發展與乾燥促進之關係是這研究之中心。

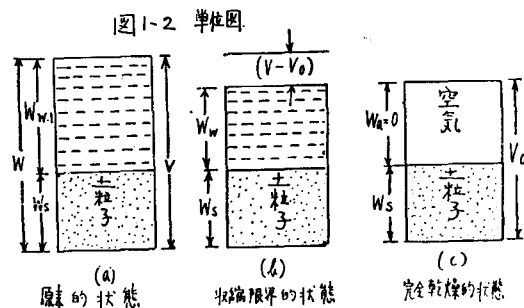
筆者希望從土壤物理方面研究龜裂之理論與事實，提供將來灌溉排水科學及工程上之參考。

### 貳、土壤之乾燥收縮，龜裂之發生及其理論

#### I、土壤的收縮機構

##### 一) 土壤乾燥的收縮步驟

攪成泥漿的土壤，裝在容器中，如圖(1-1)之模型所示，可當作水份飽和的毛管看待。而這種毛管係由連通的小直徑之孔道所構成，其毛管之壁，如受到壓縮力，可以收縮。



基於以上模型，土壤乾燥收縮之步驟可暫作如下之看法：

- i) 將土壤裝在容器內以後，土壤的表面，有如圖(1-1@)所示被水覆蓋之狀態。此時之水之表面張力，僅對水面有作用，對土壤壓縮力之張力，則尚無影響。
- ii) 大氣若十分乾燥時，土壤表面即開始蒸發。經過一段時間之後水面正好與土面平。此時，毛管中之水面與土面乃成一平行，彎月面尚未形成，在此情形下，壓縮土壤之張力仍未能形成。
- iii) 乾燥如更進一步時，土壤之毛管中即受到水膜張力之作用其力量即為土壤收縮之原因。由此而進到乾燥狀態，有如下兩種步驟：

第一；

毛管中水之表面，因為表面張力之關係，而形成曲面（毛管中之彎月面）毛管如圖(1-1)所示，若其半徑為  $r_0$  時，則依毛細管公式彎月面兩方壓力差為；

$$Q = H\rho g \text{ dyne/cm}^2 \dots\dots\dots(2-1)$$
$$= 2T\cos\theta/r_0$$

$$H = \text{水柱高度}, H = \frac{2\alpha}{r_0 g}$$

$\rho = \text{密度} \doteq 1$

$g = \text{重力加速度 cm/sec}^2$

$T$ ：水之表面張力

$\theta$ ：毛管壁與水之接觸（濕潤）角

$r_0$ ：毛管（圓筒型）之半徑

毛管周界所受之力為  $2\pi r_0 T$ ，此種力有垂直及水平兩分力，均為土粒柱之抵抗而平衡。此種土粒柱抵抗力乃是壓縮土壤毛管壁之原動力，使水從毛管中之小間隙中擠出來，因此土壤即漸次收縮。此時毛管中水之表面在土壤之上端形成彎月面狀態。依蒸發而失之水量等於所收縮之量，即是，土雖被收縮，惟乃保持其間隙之飽和狀態。

第二；

第一步驟結果之後，彎月面則進展至毛管內部，且因空氣浸入，因此內部間隙開始蒸發，因土粒柱之抵抗增加，土壤收縮程度亦減緩，至某一狀態時，乃停止收縮。

## 二) 毛管壓力與土粒柱之抵抗

把毛管當作理想之圓筒型（半徑  $r_0$ ）之束，則依著毛管彎月面之張力而成為下式壓縮力  $P_c$  之動態。

$$P_c = 2T\cos\theta/r_0 \dots\dots\dots(2-2)$$

因此土壤在脫水過程中，其體積收縮之原因是由於毛管張力之作用，例如土壤，當其在液狀時，水分之表面張力所產生之收縮力為零，如果漸漸蒸發脫水，則毛管張力開始活動，其在每粒土壤顆粒之外面，以垂直於表面之方向向內曳引，使體積漸漸縮小，同時土壤本身抵抗收縮之力亦漸增加，終至土壤抵抗收縮力與蒸發含水之毛管張力達於平衡。達到平衡後之土壤，雖再蒸發脫水其體積不致更有顯著變化，此時之土壤含水量謂之縮性限度。如在土壤之內部發生蒸發而達到第二步驟之壓縮力，則

$$P_c = T \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \dots\dots\dots(2-3)$$

$T$ ：水之表面張力

$r_1, r_2$ ：形成在粒子間之水膜內外面半徑（彎月面的半徑）

由此可以想像支配收縮之土性及水性因子，即為粒度和粒子之疏密關係，以及水之物理和化學性質及水膜之形成狀態等。

## II、土壤收縮之特性

### 一) 土壤在收縮過程中所呈現之一般性質

表示土壤收縮過程，以土壤體積與含水量之遞減關係，來考察其過程中之性質。

本研究曾很多人<sup>(10,11,12,13,14,15,16,17,18)</sup>以得到如下五種結果：

- i) 土壤收縮與乾燥是呈有規則相關。其經過步驟，有恆率收縮 (Steady shrinkage) 和減率收縮 (Unsteady shrinkage)，最後達到殘收縮 (Residual shrinkage)，然後停止收縮。
- ii) 泥漿乾燥時，在理論上，收縮之第一步驟，如正規收縮 (Normal shrinkage) 之時，土壤所減少之體積與損失含水量之體積相同。
- iii) 間隙在飽水狀態時，任何種類之土壤體積均與所減少之體積及含水體積有直線性之相關。
- iv) 土壤在進行脫水時，曲線有顯著之彎曲，即土壤體積減少比土中水份體積減少為少，此時空氣進入土壤間隙中，而使土壤逐漸成為非飽和狀態。惟當達成此種狀態時，含水之減少速率，較高水份階段為緩慢。
- v) 在同一之乾燥條件下，土壤乾燥時，在非飽和狀態時之含水量與土壤之粒徑有關，一般以粘質越多，而其含水減少率越低，而成圖(1-2)之狀態。

## 二) 土壤收縮性質與其他分類特性之關係

- i) 對於液性限界 (Liquid limit: WL) 與縮性限界 (Shrinkage limit: WS) 之比 (WL/WS) 即表示土壤之一般性收縮性質。
- ii) 土壤之全收縮量之大小, 即以粘土含有量 ( $5\mu$  以下之粒徑) 而定。至於成爲非飽和狀態時, 即停止收縮量時之大小, 則以有機膠質及無機膠質之親水作用 (Hydrophile) 而變化。

### III、收縮型與土壤構造

土壤脫水過程中, 其對土壤力學性態之變化<sup>(29, 30)</sup>, 可說明如下: 由於液性限界以高水分階段, 對土壤變形抵抗力極爲細小, 則變形量與脫水量完全一致。此即相當於 Heines 氏<sup>(18)</sup> 所符合之 Normal shrinkage 之階段。如水分逐漸降低下至塑性狀態時, 土壤強度逐漸增大, 則變形量將因脫水而減少。此種階段即稱之爲 Residual shrinkage。

Normal shrinkage 與 Residual shrinkage 之界限, 即在空氣之侵入開始爲起點, 其與土壤構造有密切關連。惟完全鍊結之土漿, 則其值可認爲近於液性限界 PF1.5 附近。

自然土層之土壤在乾燥機中漸次乾燥, 觀察其收縮曲線, 則可將土壤構造之內容反映出許多特徵。一般收縮曲線之變化激烈時, 即可認出收縮曲線上有明確之轉折點與沒有明確之轉折者。此即表示團粒外之水被脫水後, 團粒內之水仍繼續脫出而所呈繼續收縮之特徵。另一方面, 詳細觀察在收縮曲線上有現示折點時, 則可認定含水比大者, 其收縮亦大。再者, 還有一現象, 當含水比慢慢低下之後, 才開始現示較大收縮者亦有。前者 PF 低, 內部應力小。故可引起較大收縮。因此, 可說是應力強度弱土之壤。惟後者則可謂應力強度大之土壤。

收縮曲線與 PF 水分曲線有著密切之關連。雖屬同一粘土礦物構成, 其粒度, 充填之樣式均大致相似, 在同一 PF 值下, 因其結合水含有量愈多, 則土壤收縮力亦愈大。

又一般認定土壤容重較低者其收縮比率較大, 多年不翻動容重較高之土層, 其收縮比率較小。

## 參、研究的試驗範圍與方法

### I、調查地區概要

調查對象, 爲臺北, 桃園及臺南等三地區, 惟大部份在臺北進行。

臺北係在國立臺灣大學農工系實驗農場裡進行,

選定四個認爲排水不良, 且特別粘重之水田土壤之地區, 觀察其龜裂之發生過程。同時, 並將該土壤, 裝於溫室內之 Concrete box, 進行各種模擬龜裂試驗。桃園地區, 是在內壢之農業工程中心實驗農場, 磚紅化粘質土壤上舉行。臺南以新營與學甲附近之水田爲中心, 進行野外實地調查。

### 一) 地形及土地狀況

臺南地區是一般農家水田, 屬磐層土 (Planosol)。臺北係一盆地砂頁岩質沖積土, 桃園爲臺地紅壤 (Laterite), 後兩者因係實驗農場, 故設備比較完善, 試驗田區爲 concrete 之田埂。

上述三地區土質均極粘重, 粘粒含量在 50-60% 以上, 故土壤物理性態惡劣, 一般在濕潤時泥濘粘閉, 通氣及排水不良, 乾燥則呈堅硬龜裂, 影響耕作及灌溉用水的管理。

### 二) 氣象條件

請查區域分布於北緯 23°-25°, 屬亞熱帶性之氣候條件。又半乾燥期與半雨期之區別甚明顯, 一般高溫多雨多濕。

有關氣象狀態, 則採用臺大農場內, 觀測氣象場地記錄資料。

表 2-1 臺灣全省各地各種氣象因素變化表<sup>(19)</sup>

項目	氣 溫 (°C)				相對濕度 (%)						
	臺北	臺中	臺南	臺東	臺北	臺中	臺南	臺東			
2	15.8	16.5	18.1	19.9	86	83	81	79			
3	17.8	19.3	21.0	21.9	85	83	80	80			
4	21.3	22.6	24.2	23.9	83	83	81	81			
全年平均	22.3	22.8	23.9	24.2	83	82	82	80			
雲 量		風速(m/sec)				雨 量 (mm)					
臺北	臺中	臺南	臺東	臺北	臺中	臺南	臺東	臺北	臺中	臺南	臺東
8.2	6.4	5.4	7.8	2.9	2.0	3.4	3.2	149.3	61.7	24.6	33.9
8.4	7.3	5.7	7.9	3.0	1.9	3.0	3.0	148.2	67.8	33.6	42.6
8.0	7.2	5.8	7.7	2.8	1.6	2.5	2.8	173.0	140.5	88.4	121.5
7.6	6.7	5.8	7.2	3.0	1.7	2.6	3.0	總計 2,102.9	1,891.6	1,875.2	1,855.6
降雨日數 (日)				蒸 發 量 (mm)							
臺北	臺中	臺南	臺東	臺北	臺中	臺南	臺東				
16.4	10.3	6.3	10.1	73.4	95.9	96.9	103.5				
17.5	11.1	5.5	12.1	89.2	117.5	130.4	133.5				
15.1	11.2	7.3	12.4	105.8	129.7	137.5	140.4				
總計	189.2	124.7	109.2	140.6	1,413.9	1,646.6	1,453.4	1,698.1			

表 2-2 實 驗 期 間 之 氣 象 觀 測

(於) 臺大農工系，園場氣象觀測露場

測 定 內 容 旬別 及 日數	細 目 年 別	天 氣 情 形			風 力	積算 雨量 (mm)	氣 溫 (園場氣象 觀測露場)					氣 溫 (室內)				氣 溫 (溫室)				溫室內濕度		蒸 發 量 日平均 (mm)	
		晴天 日數	曇天 日數	雨天 日數			平均 (°C)		最高 (°C)	最低 (°C)	積算溫度 (°C)		平 均 (°C)		積算溫度 (°C)		平 均 (°C)		平均 (%)				
							9:00	14:00			9:00	14:00	9:00	14:00	9:00	14:00	9:00	14:00					
																			(14時~翌日 9時)				
2 月上旬 (10天)	1971	2.0	4.5	3.5	—	42.4	10.95	11.8	9.8	7.7	103.0	106.5	10.3	10.65	—	—	—	—	—	—	—	—	1.01
2 月中旬 (10天)	1971	4.0	5.0	1.0	3.3-3.8	15.7	16.6	17.9	16.9	12.3	151.5	170.5	15.15	17.05	—	—	—	—	—	—	—	—	2.09
2 月下旬 (8 天)	1971	2.5	3.5	2.0	3.25-3.75	42.7	18.63	18.94	19.75	13.75	139.5	147.0	17.48	18.38	154.0	191.0	19.25	23.88	79.6	80.7	—	—	1.75
3 月上旬 (10天)	1971	3.0	3.5	3.5	3.0-3.6	28.4	16.1	17.95	17.0	12.25	156.5	175.0	15.65	17.5	184.0	218.5	18.4	21.85	85.2	87.6	—	—	1.40
	1972	9.0	1.0	0	—	0	14.85	17.30	16.45	7.45	127.5	143.5	12.75	14.35	—	—	—	—	—	—	—	—	3.26
3 月中旬 (10天)	1971	5.0	2.5	2.5	2.9-3.2	68.9	16.2	17.7	16.9	12.0	156.0	174.0	15.6	17.4	186.5	226.0	18.65	22.6	81.6	84.9	—	—	2.22
	1972	9.0	1.0	0	—	0	18.7	22.6	22.25	11.55	168.0	198.0	16.8	19.8	—	—	—	—	—	—	—	—	3.25
3 月下旬 (11天)	1971	9.5	1.5	0	2.5-3.0	8.0	20.95	23.32	23.14	13.05	221.0	251.0	20.09	22.82	263.0	308.5	23.91	28.05	81.8	73.8	—	—	3.53
	1972	8.5	2.0	0.5	—	10.9	19.45	20.86	21.95	13.45	190.5	190.0	17.32	17.27	—	—	—	—	—	—	—	—	4.14
4 月上旬 (10天)	1971	5.5	4.5	0	—	19.3	21.4	22.5	23.15	16.3	208.0	221.5	20.8	22.15	241.0	258.0	24.1	25.8	84.3	84.5	—	—	2.03
	1972	2.0	7.5	0.5	—	67.5	17.25	17.45	17.95	12.65	152.5	154.0	15.25	15.40	—	—	—	—	—	—	—	—	1.58
4 月中旬 (10天)	1971	6.5	3.5	0	—	1.1	21.5	22.7	21.9	15.3	204.5	223.0	20.45	22.3	253.5	293.0	25.35	29.3	71.8	70.2	—	—	4.80
	1972	7.5	2.5	0	—	8.3	23.65	26.15	25.45	17.90	214.5	232.0	21.45	23.2	—	—	—	—	—	—	—	—	3.24
4 月下旬 (10天)	1971	4.5	4.5	1.0	—	11.9	24.05	24.2	24.3	17.65	235.0	241.0	23.5	24.1	—	—	—	—	—	—	—	—	3.41
	1972	5.0	4.0	1.0	—	7.5	21.4	22.75	23.2	16.6	191.5	205.5	19.15	20.55	—	—	—	—	—	—	—	—	3.80

### 三) 地下水位

野外試驗時，地下水位對於水田粘質土壤因乾燥而收縮或龜裂之關係，其影響非常大。除了有些特別地區之外，均可認為其地下水位分佈比較低。惟因調

查地區之農場，限定於粘質土壤，故一有下雨，即長期呈濕地狀態。

### 四) 土壤物理性態

#### A. 土壤之機械組成分及其物理性態

表 2-3 土壤機械組成分及其物理性態

地點	測定種類	(平均)	(平均)	液性 界限 %	塑性 界限 %	塑性 指數	收縮 界限	平均	平均	$5\mu <$	$< 2\mu$	分析	粘質 主成分
		比重	假比重					Sand %	Silt %	Clay 1 %	Clay 2 %		
臺大	①	2.678	1.693	35.8	22.6	13.2	20.1	①	24.58	57.15		粘土	伊來石
	②	2.663						②	40.06	40.34			
	③							③	38.26	48.10			
桃園		2.660	1.610	31.7	19.7	12.0	19.5	①	22.62	57.74		粘土	綠泥石 高嶺石
								②	24.62	61.74			
臺南		2.448	1.411	32.6	19.5	13.1	19.0	①	35.85	22.12	37.05	粘土	伊來石 含鐵綠 泥石
								②	37.30	45.85	3.65		

根據上表可知：臺北臺大農工系農場，其粘粒含量在 40-60% 之間，桃園，臺南亦達 50-60% 之程度。

容量：日本主要土類之容量看來<sup>(20)</sup>，本研究地區土壤之乾燥容重為 1.4-1.6 左右，可謂相當大。

#### B. 龜裂與 PF-含水比之關係

在無龜裂之其他部份其特徵為幾乎沒有非毛管孔隙（大孔隙）存在，其保水力強，多屬透水性不良者。惟在自然狀態下土地受乾燥時，多少有龜裂之存在，此種土壤，其透水性一般均在  $10^{-4}$  cm/sec 以上。

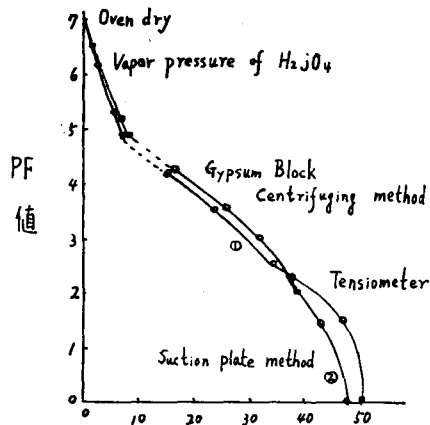


圖 2-2 PF-含水比之曲線。臺大（平均）

## II、試驗方法

為欲明瞭粘質水田土壤，乾燥對龜裂之影響，試驗分田間及室內同時舉行，前者係考慮降雨因素，後

者是在溫室（concrete box）裡，進行模擬龜裂實驗。

#### 一) 野外（田間）試驗

在臺大農工系試驗田，選定四個濕地區域，於其中設置 1m×1m 之框子，觀測之重點特別在氣象各因素條件與龜裂發生發展狀態時之含水量等之關係。

龜裂發生之含水量比由直接採土而定之，其發展之狀態，則以鐵絲及量規來測定其寬度及深度（精密度為 1mm）。

又，為顯出龜裂之發展狀態，在四個試區中，土壤表面之框子內分成 25cm×25cm 之方格，各 16 格，以 10 支測線等距離分隔而成，在各方格內，若龜裂寬度達 0.5cm 時，測定其與測線相交之龜裂斜度分佈形狀，然後分類表示其數量。

#### 二) 室內試驗

為避免降雨及風速之干擾而影響試驗之精確性，故在溫室內亦同時進行試驗，試鉢係採用 Concrete box {55×40×(40+20)} cm<sup>3</sup>，土壤物理性態如表(2-3)及圖(2-2)所示。

A. Concrete box 模擬龜裂試驗……將二年前就風乾，其物理性如表(2-3)之原狀粘質土壤，加以調製成大致呈液性界限（Liquid limit）（大約 50% wt.）之流動性態含水量比，攪拌均一，進行如下之模擬試驗：

①於 Concrete box 和粘土之間，預先貼上較厚 Vinyl sheet 以防止粘土由於乾燥收縮而成

Concrete box 與粘土之間之空隙蒸發，而影響其土壤表面之乾燥之情形，如圖(2-3)之 (No. 1, No. 2) 所示。

- ②不貼 Vinyl sheet，使其從空隙間之土壤壁面亦能進行蒸發之情形(圖2-3)之 (No. 3, No. 4)。
- ③事先於中央，以人為方法作成深度 5cm 寬 1cm

之 V 字形龜裂間隙，以促進其乾燥之情形，如圖(2-3)之 (No. 2, No. 4)。

- ④周邊以 Vinyl sheet 包捆，土表用乾燥之草及樹木板遮蓋，其乾燥受抑制之情形下，如圖(2-3)之 (No. 1, No. 2)。

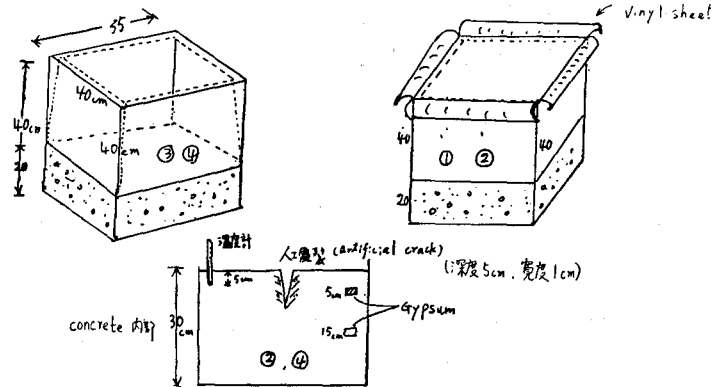


圖 2-3 實驗裝置

就以上各種情形，調查粘土側面之乾燥收縮狀態，同時直接測表面下 2cm 處之土壤含水量，逐日之變化情形(總共53天)，研究其與龜裂面本身之影響程度，如圖(2-3)所示。因此，在該試體中央深各 5cm, 15cm 處，埋設 Gypsum Block，測定其土壤水分變化。又在溫室內之供試土柱中置一溫度計，埋入土壤深度 5cm 處測定土壤溫度。測定期間濕度大致為 75-80% 左右。

#### B. Lysimeter 模擬龜裂試驗

以 Concrete 體積  $(90 \times 216.5 \times 23.7) \text{ cm}^3$  大小的 Lysimeter，作同樣原理之框子，於其中放置臺大農工系農場之粘質水田土壤，然後調製成爲均一飽和，再加滿水放置四天，攪拌之使其大致呈液性限界以上之流動狀態。觀測土壤之物理性與質地對 PF-含水比之關係，如表(2-3)及圖(2-2)。

於 Lysimeter 中，將 Tensiometer 置於深度 10, 15, 19cm 之處，Gypsum Block 置於深度 5, 15cm 之處，以測定土壤含水呈遞減後之土壤水分逐日間之變化。同時，爲欲比較乾燥特性由於有無龜裂而發生之變化，因此在 Lysimeter 之全土層中埋入直徑 32.5cm，高度 30cm 之銅製圓筒(Intake rate 測定用 Cylinder)，其圓筒內面貼上 Vinyl sheet 並於筒內埋入與上述同樣深度設置 Tensiometer 和 Gypsum Block 等。又土中於 5cm 及 10cm 之處埋置溫度計，測定土中由於土壤乾燥而發

生之溫度。再者，測定含水量用土壤，採取表面下 2cm 之處。



照片 1. Lysimeter 模擬龜裂試驗

#### C. 裂隙內不同深度間乾燥蒸發量之比較試驗

爲要比較裂隙內不同深度土層之乾燥蒸發量，因此，再次攪拌上次所用過之土壤，飽和後裝入 concrete box 中。計有三個處理各處理，於其中央位置，預先用人爲挖寬 5cm，深達 40cm 之 V 字型龜裂。分別爲 No. 1, No. 2, No. 3 試驗箱。圖(2-5)。

- ① Concrete box No. 1 裝入粘質土壤後，各經過 13 日，28 日，36 日之乾燥過程，然後將同樣之粘質土壤攪拌至大致液性限界，取約 10g 放在油紙上，放置於 V 字型之中央位置各別深度處 5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm，用線子懸掛，以比較各試料之乾燥速度。

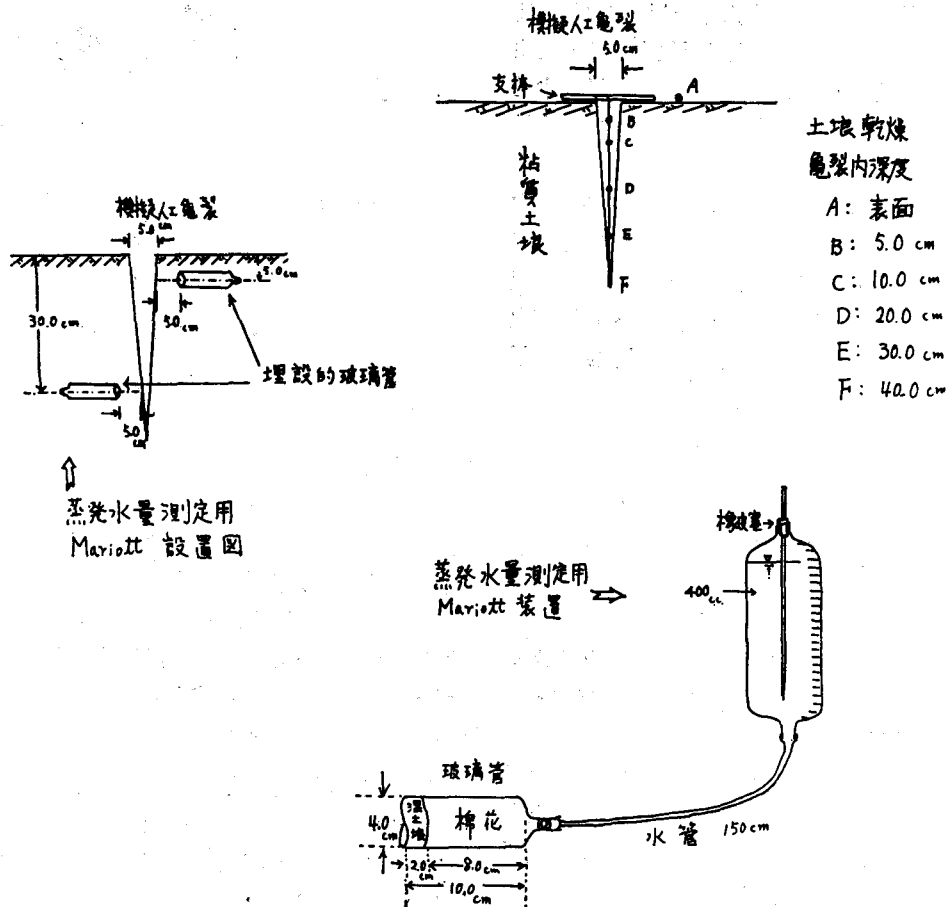
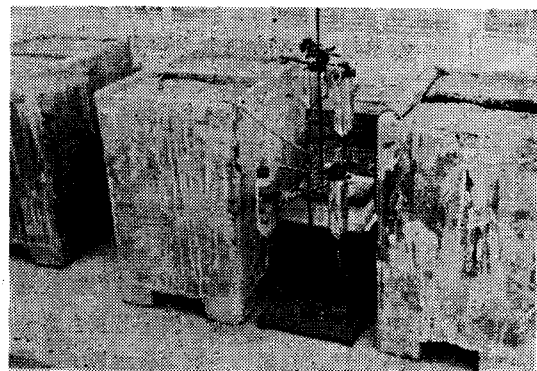


圖 2-5 實驗裝置

②試驗用 Concrete box No. 2, No. [3], 在深度 5cm, 30cm 之龜裂面內部 5cm 之處, 埋設直徑 4cm, 長度 10cm 之 Mariott 玻璃管, 為使裂隙面土壤水分保持一定, 因此在 Mariott 管內盛以 8:2 之比例之棉花與土壤。從 Mariott 裝置水位, 變化, 亦即 Mariott 給水裝置中所減少之水量, 以求蒸發水量。又用線子在 Concrete box No. 2 內, 懸掛液性限界之粘質濕土, 進行不同裂隙面深度間乾燥所消耗量之比較試驗。

### 三) 其他

為欲比較有關臺大農工系農場水田, 桃園(內壢), 臺南(新營, 學甲)等地區粘質土壤水田裡所發生之龜裂過程, 因此, 亦同時調查其粘土之性質, 龜裂發生之過程, 大小等問題。有關土壤物理性之測定, 是在當地取樣後, 然後携返臺大農工系實驗室及農化系土壤實驗室進行分析。



照片 2. 裂隙內乾燥蒸發量之比較試驗

## 肆、試驗結果與討論

### I、粘質水田土壤之乾燥特性

#### 一) 有關地表上蒸發之因素

土壤表面被水充分濕潤時, 所蒸發之水量, 與地上水所蒸發之量相等。惟表層乾燥時, 則蒸發量減少



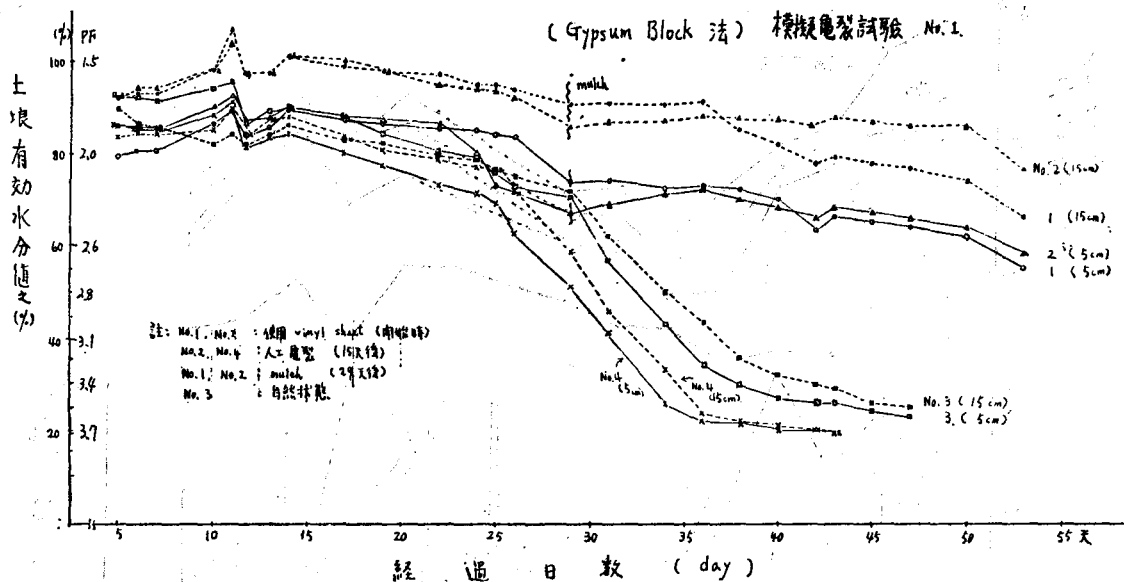


圖 3-4 粘土之乾燥曲線。(Gypsum Block 法) 模擬龜裂試驗 No. 1

由上述實驗結果開始測定後第五天，土壤含水量大約在 48-55% 之飽和狀態時，發生側面收縮之龜裂，concrete box 所填裝粘質土壤之乾燥特性約以 45% 之平均含水率時，為臨界點，此際發生異狀乾燥狀態 (Abnormal dry)\*，由此分別出恒率乾燥 (Steady dry) 與減率乾燥 (Unsteady dry) 兩大階段。

No. 1 及 No. 2 是以 Vinyl sheet 封住土壤側面，結果與另外之 No. 3 及 No. 4 比較，平均產生相差 5% 至 8% 之含水率。在實驗期間 (開始後第 29 天) 仍然在 No. 1 及 No. 2 覆蓋 Vinyl 乾燥草和木板等，然後調查其土壤水份變化之影響，結果其土壤水分之減少，並無多大顯著直至最後 (第 55 天) 與另外之 No. 3 與 No. 4 一比較產生平均含水率約相差 20%，因 No. 3 並未加予任何人工實施，而是自然狀態之乾燥，故亦無妨視為 Concrete box 土壤乾燥之平均值，然而 No. 2 及 No. 4 在實驗開始後第 15 天行人工深度 5cm，寬 1cm 之龜裂現象，研究對乾燥之影響覆蓋 Vinyl sheet 和 Mulch 型之 Box 乃是相差 3-4%，而並無多大顯著，然而自然狀態却約比其減少 5-8%，可見其影響顯著。一般說來，土壤在自然乾燥過程中，其含水量與經過時間之關係，有覆蓋 Vinyl sheet 及無覆蓋 Vinyl sheet 間之比較，其乾燥蒸發分量之相差頗大，其原因乃是由於土壤之收縮，而由 Concrete 與土壤間隙蒸發為一大原因乃屬無疑。換言之，覆蓋 Vinyl sheet，No. 1

，No. 2 之情況，由於隨著粘質土之乾燥收縮，蒸發表面積將縮小，而蒸發分量亦隨而減少，反之 No. 3，No. 4 之情況，其間隙之寬度擴大，同時認為由於土壤側壁面之收縮，亦視同龜裂面而增加蒸發分量，此點，在 Lysimeter 之實驗裡，亦有同樣之結果，至於實驗材料之土壤水分值是採用 Gypsum block 之電氣抵抗法所測定，以有效水分之割合表示之，惟自實驗開始後初期，第 14 天中 (平均含水率為 45%，PF 值為 1.9) 土壤水份接近飽和狀態，因此測定之工作無法進行\*\*，自第 25 天 (PF 值平均 2.0) 左右却呈現了緩慢之減率，乾燥曲線，之後，土壤水分却急激減少 (恒率乾燥) 而繼續靠電氣抵抗法測定，直至有效水分值約 25% (PF 3.5) 為止，而呈減率乾燥。No. 1 以及 No. 2 係覆蓋 Vinyl sheet，因此土壤水分之減少並無多大顯著，但在深度 5cm 與 15cm 之地方却有很大之差別。平均竟有 10% 至 20% 左右之差距 No. 3 與 No. 4 之情況其差距平均 5% 左右而已。但 No. 4 之情況由於實施人工龜裂，因此，在深度至 15cm 地方之乾燥，却受到劇烈影響。從實驗開始後第 36 天左右起，表面下 5cm 與 15cm 地點之值却大同小異，至第 43 天，在有效水分值之 20% (PF 3.7) 於是靠電氣抵抗之測定則無法進行\*\*。

\* 異狀乾燥狀態是依粘質土壤內之土壤孔隙間水之移動。

\*\* 這一段水分量乃可認為 Gypsum block 法之測定，有效範圍。

表 3-2 田 間 龜 裂 觀 測 No.2

於：臺大農工系試驗田

(Feb. 18, 1971-Mar. 5, 1971)

測定時間：P.M. 2:00-P.M. 6:00

調查項目	測定日	測定日															備 考	
		2月19日	20日	21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日	28日	3月1日	2日	3日	4日	5日		
第一調查區 (日)	氣 候 要 素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	注： 2月 16日：曇天，溫度 17.2°C，浸 水狀態 17日：曇天，溫度 13.0°C，浸 水狀態 18日：晴天，溫度 17.1°C，有 強風 水田表面沒 有水，小龜 裂發生 19日：晴天，溫度 20.8°C，有 強風 發生很多龜 裂，第一回 測定 地下水測定有限 深度：70cm 蒸發量測定： Pan φ=100cm 溫度測定： Psychrometer method	
	天氣情形	晴天	晴天	晴後 曇天	晴天	晴後 曇天	曇後 晴天	曇天	曇天	雨天	雨天	曇天	晴天	雨後 曇天	晴天	曇後 晴天		
	氣溫 (°C)	9時	18.0	21.5	24.0	24.0	22.0	15.5	17.0	14.0	17.0	15.5	22.0	19.0	14.0	14.5		17.0
	14時	20.5	25.0	22.0	26.5	19.0	17.0	15.5	17.0	17.0	18.0	24.0	25.5	13.5	16.5	18.0		
	降水量 (mm)	0	0	0	0	0	0.5	2.0	0.4	11.0	28.8	0.2	1.3	4.3	0	0		
	風向	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E		
	風速 (m/sec.)	4-5	3-4	3-4	4	4	3-4	3-4	3	3	3	3	3	3-4	3-4	3-4		
	蒸發量 (mm)	4.22	5.22	2.40	2.26	3.78	2.02	1.94	0.60	0.64	0.32	0.84	2.28	1.58	2.20	3.20		
	地下水 (cm)	A點	-	-	-	-	-	-	-	-	56	12.0	32.0	39.0	32.0	50.0		57.0
	B點	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	15.0	23.0	31.0	41.0	49.0		52.0
濕度 (%)	-	-	70	71	66	78	79	88	90	100	100	71	94	79	75			
第二調查區 (日)	龜裂 No.1	D. 2.5	5.7	6.0	6.3	8.7	13.2	13.4	13.5			8.2	13.0	9.8	13.4	13.6		
	W. 0.5	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.2	1.2			0.9	0.7	0.9	0.9	1.1			
	龜裂 No.2	D. 3.0	5.0	5.2	5.4	12.7	13.0	12.5	12.8			13.1	13.1	13.2	12.7	13.1		
	W. 0.6	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	1.5	1.6			1.0	1.0	1.0	1.2	1.4			
	龜裂 No.3	D. 5.1	14.4	14.5	14.6	16.0	16.3	16.5	16.5			15.4	15.2	14.8	15.7	16.1		
	W. 0.6	1.2	1.2	1.5	1.6	1.7	1.5	1.6			1.1	1.1	0.9	1.2	1.5			
	龜裂 No.4	D. 2.0	2.2	3.0	3.1	3.3	3.6	3.6	3.6			3.0	3.2	3.4	4.0	4.3		
	W. 0.4	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8			0.8	0.6	0.7	0.7	0.8			
	龜裂 No.5	D. 2.1	3.0	3.2	3.3	3.0	3.4	3.4	3.4			8.5	8.2	9.7	8.1	8.4		
	W. 0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.8	0.9			0.7	0.5	0.6	0.6	0.8			
含水量平均 (%)	46.31	44.63	42.5	41.57	41.41	40.90	41.07	41.15			45.13	44.00	45.39	43.58	42.68			
第三調查區 (日)	龜裂 No.1	D. 5.2	13.3	13.7	14.2	15.4	15.6	16.0	16.0			12.4	12.7	14.3	14.7	14.7		
	W. 0.4	1.0	1.3	1.8	2.0	2.4	2.0	2.2			1.4	2.0	1.2	1.5	1.7			
	龜裂 No.2	D. 2.6	7.2	7.4	7.5	12.6	13.3	13.5	13.7			13.8	13.7	13.7	14.3	14.5		
	W. 0.3	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.4	1.5			1.2	1.3	1.3	1.3	1.7			
	龜裂 No.3	D. 4.6	13.0	13.3	13.9	14.7	14.9	13.9	14.0			9.2	13.8	13.9	14.2	14.3		
	W. 0.7	1.6	1.7	1.8	2.0	2.0	1.6	1.8			0.9	1.0	0.9	1.0	1.2			
	龜裂 No.4	D. 3.0	5.8	16.0	16.4	16.1	16.4	16.4	16.4			12.4	13.8	14.5	14.4	16.1		
	W. 0.5	0.9	1.3	1.4	1.2	1.4	1.2	1.4			0.8	0.9	0.8	0.9	1.3			
	龜裂 No.5	D. 3.8	9.3	15.4	15.7	15.3	15.3	15.3	15.3			9.8	12.4	12.5	15.5	16.0		
	W. 0.4	1.0	1.1	1.2	1.0	1.3	1.0	1.3			0.9	1.0	0.9	1.0	1.1			
含水量平均 (%)	46.60	45.40	45.00	44.02	41.30	40.39	42.05	42.11			45.36	44.98	45.23	44.50	43.02			
第四調查區 (日)	龜裂 No.1	D. 5.9	10.9	16.5	17.1	17.7	18.3	18.3	18.5			17.6	17.5	17.5	19.1	19.3		
	W. 0.8	1.5	1.6	1.7	1.9	2.0	1.5	1.7			9.1	1.2	0.8	1.2	1.4			
	龜裂 No.2	D. 6.7	11.7	12.5	13.8	15.6	15.6	16.2	16.5			15.4	14.3	15.7	15.7	15.9		
	W. 0.6	1.6	1.7	1.7	1.8	2.0	1.5	1.8			1.1	1.4	1.1	1.5	1.6			
	龜裂 No.3	D. 3.3	6.2	8.5	10.3	15.8	16.5	15.7	17.0			14.3	16.0	16.6	16.8	16.8		
	W. 0.4	1.0	1.1	1.2	1.5	1.9	1.3	1.8			1.1	1.0	0.9	1.2	1.3			
	龜裂 No.4	D. 3.2	5.7	9.6	10.6	9.7	10.0	10.0	10.0			10.3	11.1	10.8	10.7	12.1		
	W. 0.3	0.7	0.7	0.8	0.5	0.7					0.7	0.6	0.6	0.6	0.8			
	龜裂 No.5	D. 4.2	8.9	10.6	11.0	11.1	11.5	11.5	11.5			11.3	11.2	10.0	14.5	23.2		
	W. 0.6	1.4	1.5	1.6	1.5	1.6	1.5	1.8			1.0	1.1	1.0	1.2	1.5			
含水量平均 (%)	49.62	48.55	45.51	44.91	43.15	41.04	43.06	42.85			46.45	44.50	45.66	43.76	41.01			



表 3-4 模 擬 龜 裂 試 驗 No.2 (Lysimeter 試驗)  
於 臺 大 農 工 系 試 驗 田

(Mar. 5, 1971-Apr. 13, 1971)  
測定時間: P.M 2:00-P.M 6:00

測定項目	測定地點	測定日	經過日數(day)		3月8日	3月10日	3月13日	3月15日	3月16日	3月17日	3月20日	3月22日	3月25日	3月27日	3月29日	3月31日	4月2日	4月3日	4月5日	4月7日	4月10日	4月13日
			3	5	8	10	11	12	15	17	20	22	24	26	28	29	31	33	36	39		
Gypsum Block 法 土壤有效水分值(%)	龜裂區(B點)	5cm		95.0	91.0	91.0	98.0	93.0	96.0	80.0	50.0	37.0	27.0	24.0	22.0	20.0	20.0					
		15cm		86.0	81.0	82.5	89.0	85.0	87.0	70.0	56.0	43.0	34.0	26.0	20.0	19.5	18.0					
	圓筒內龜裂防止區	5cm		86.0	80.0	83.0	89.0	86.0	87.0	83.0	77.0	72.0	66.0	59.5	53.5	51.0	45.0	39.0	22.5			
		15cm		84.0	77.5	80.0	84.0	83.0	88.0	87.0	85.0	81.0	73.0	60.5	48.0	43.0	33.0	29.0	18.0			
土壤表面水分含量平均(%)	龜裂區	A點		60.58	55.89	47.73	46.33	46.07	43.48	41.00	38.10	35.81	33.88	31.77	29.16	27.60	23.41	20.61	19.00	15.80		
		B點		60.08	54.63	46.47	45.85	43.35	43.06	41.50	39.05	36.65	35.02	34.00	32.70	31.36	28.12	25.03	23.51	18.48		
	圓筒內龜裂防止區	C點		65.60	62.74	56.50	53.47	48.45	43.18	42.31	40.11	39.07	37.50	35.89	35.50	35.09	34.01	33.02	31.59	28.73		
土中溫度(°C)	龜裂區(A點)	5cm	16.0	22.0	17.0	19.0	22.0	20.8	22.0	20.0	24.5	23.5	26.0	25.5	25.5	26.2	25.5	28.0	16.5	26.5		
		10cm	17.0	21.0	17.5	18.5	21.5	18.4	21.0	21.0	24.0	23.8	25.0	24.5	25.5	26.0	25.0	28.0	18.0	25.8		
	圓筒內龜裂防止區	5cm	16.0	22.0	16.5	19.0	22.5	21.0	23.5	20.0	25.0	24.0	26.0	25.0	25.5	26.7	26.0	28.5	17.2	26.0		
		10cm	16.5	21.5	17.5	19.0	21.0	19.5	23.0	21.0	24.5	24.5	25.5	25.0	25.0	26.5	25.5	28.0	18.5	25.6		
龜裂狀態(cm)	No.1	D.			3.0	8.0	8.5	9.1	13.8	15.0	18.1	19.2	19.2	19.0	18.8	19.1						
		W.			0.3	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.6		
	2	D.			5.1	8.1	9.2	11.7	14.2	16.0	18.5	20.0	20.0	19.6	19.6	19.7						
		W.			0.7	0.9	1.0	1.2	1.6	2.1	2.8	3.3	3.4	3.5	3.5	3.7	3.7	3.8	4.0	4.0		
	3	D.			2.1	6.5	8.3	11.7	14.4	17.1	18.2	19.0	19.1	18.7	18.6	18.6						
		W.			0.4	0.9	1.2	1.4	1.7	2.0	2.5	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1	3.2	3.3	3.5	3.4		
	4	D.			4.2	6.2	7.7	8.1	9.9	11.4	14.0	15.5	17.0	18.6	18.6	18.8						
		W.			0.3	0.7	0.9	0.9	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.1	2.1	2.1	2.2	2.3	2.5	2.4		
	5	D.			2.6	6.9	7.2	8.9	9.7	12.0	15.6	17.5	17.6	17.6	18.2	18.4						
		W.			0.4	0.7	1.0	1.1	1.4	1.6	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.7	2.9	2.8		
	6	D.				8.1	10.5	12.3	13.7	15.4	17.0	17.7	17.8	18.0	18.4	18.6						
		W.				1.0	1.2	1.3	1.9	2.3	2.9	3.2	3.2	3.2	3.4	3.5	3.6	3.6	3.7	3.6		
	7	D.				4.6	5.3	9.7	10.5	13.0	16.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.1						
		W.				0.7	0.8	0.9	1.3	1.9	2.4	2.9	3.0	3.1	3.2	3.1	3.3	3.5	3.7	3.7		
8	D.							5.3	5.9	8.8	11.1	12.6	15.0	17.3	18.5	18.5						
	W.							0.6	1.0	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.1	1.7	1.7	1.9	1.8		
9	D.							8.6	9.8	10.5	16.0	18.1	18.2	18.2	18.3	18.3						
	W.							1.0	1.3	2.0	2.2	2.3	2.3	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.9	2.8		
10	D.							7.2	11.1	14.0	16.5	18.5	18.5	18.6	18.3	18.0						
	W.							0.9	1.4	1.8	2.1	2.5	2.5	2.6	2.8	2.8	2.8	2.9	3.1	3.1		
11	D.							8.5	10.1	14.2	16.8	17.2	17.3	17.4	17.4	17.2						
	W.							0.9	1.4	1.7	2.0	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7	3.0	2.9		
12	D.							2.0	9.1	12.5	17.1	18.3	18.6	18.8	18.6	18.5						
	W.							0.3	0.5	1.0	1.5	2.1	2.4	2.6	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	3.1		
13	D.							4.1	16.9	17.1	17.6	18.0	18.4	18.2	18.1	18.1						
	W.							0.3	0.9	1.2	1.3	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8		
14	D.							5.1	8.0	15.0	18.3	18.8	18.9	18.3	18.2	18.2						
	W.							0.4	1.1	2.0	2.4	3.0	3.3	3.4	3.5	3.5	3.6	3.6	4.0	4.1		

注: 2月16日: 採土, 乾燥  
 3月1日: 加水, 粘性狀態  
 3月5日: 加水後 Concrete 砂內投入  
 3月10日: 龜裂開始, 第一回測定  
 4月10日: 特殊龜裂發生

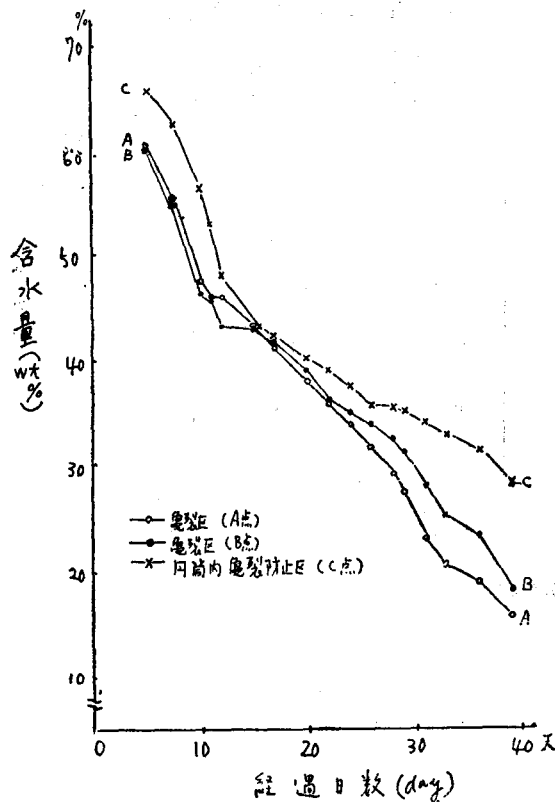


圖 3-5 乾燥曲線  
Lysimeter 模擬龜裂試驗

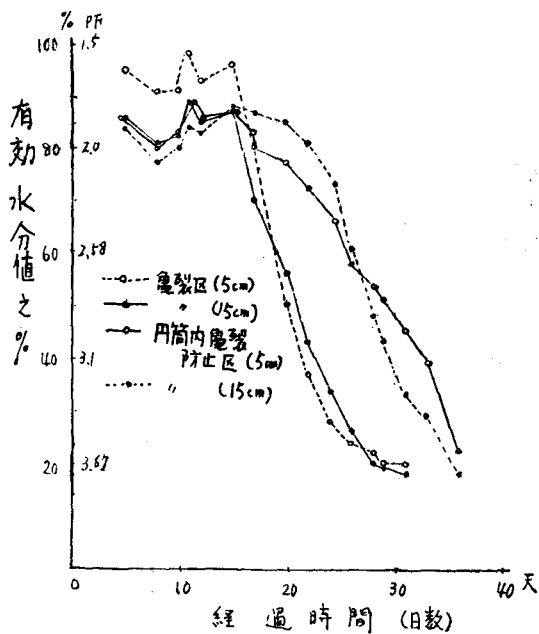


圖 3-6 土壤水分之變化  
Gypsum Block 法

再者，欲將前述以 Concrete box 所作之模擬龜裂實驗之結果，更加明確起見，以大型之 Concrete box (與 Lysimeter 同樣處理方法) 作土壤之乾燥特性調查。在 Cylinder 內之龜裂防止區，與龜裂區相比，土壤含水量減少量是緩慢的，在龜裂區裏，由於擁有乾燥之促進，因此在龜裂防止區之 Cylinder 內，其土壤表面因受到乾燥收縮之凝固，且蒸發面縮小之故，隨著經過之時間延長却與乾燥量成正比例。

依照 Gypsum block 作電氣抵抗之測定結果，在龜裂區裏，從第15天 (PF 1.9) 至第26天 (PF 3.5) 乃呈現恒率乾燥，之後才呈現減率乾燥之形狀。如同前述，電氣抵抗之測定，大約在第28天為有效水分值之 20% (PF 3.7) 左右。同樣地在 Cylinder 內則以緩慢之恒率乾燥形狀而減少，在第 36 天則達 20%。而且從第28天 (PF 2.85) 左右，由此可知深度 15cm 者，則比深度 5cm 者，其乾燥程度較為激烈之事實。由此想像得到乃由於 Concrete 底面所受之熱度較表面強，因此下部之蒸發較激烈。如上所述由 Concrete box 所作之模擬實驗與由 Lysimeter 所作之模擬龜裂實驗兩者乃呈現了大同小異之乾燥特性。

### 三) 在土柱內垂直斷面之乾燥特性

在 Concrete box 所作模擬實驗完了後之第 54 天，將 No. 2 及 No. 4 之 Concrete box 內所置之土柱破開取出，於是作了垂直水分分布深度別之測定，其結果如同下圖 (3-8) 並 (3-7)。

由側面向中央部，各個設定為 A, B, C 與 D, E, F。在 No. 4 之情況，自表面至表面下 10cm 呈現著水分急劇減少，但在 10cm 以下則無多大變化。在 A 地點可推知由於土壤收縮，是側面之蒸發，乾燥之進行比中央部分快，而且至深度約 20cm 均受其影響。No. 2 之情況，在 D 部分以 Vinyl sheet 防止由於收縮所產生蒸發，同時，因表面覆蓋之關係，故土柱全部並無多大變化，水分含量是 35% 左右。

上述實驗結果顯示隨著時間之經過，從表面至深度 10cm 左右之含水率是顯著地減少，然而深度 10cm 以下之地方，其含水率則無多大差別，乃為事實，因此，關於從土壤表面之自然乾燥之限度，大約在深度 10cm 左右而已，同時可知在覆蓋區，因能防止土壤溫度極端上升，因而減少土壤蒸發，所以土柱全部其長期間之含水量，約可保持 35% 左右，同時關於 No. 4，在側面與中央部份之含水率，其相差顯著，是表示，由於土壤收縮所產生側面龜裂之蒸發乾燥效果極其顯著之緣故。

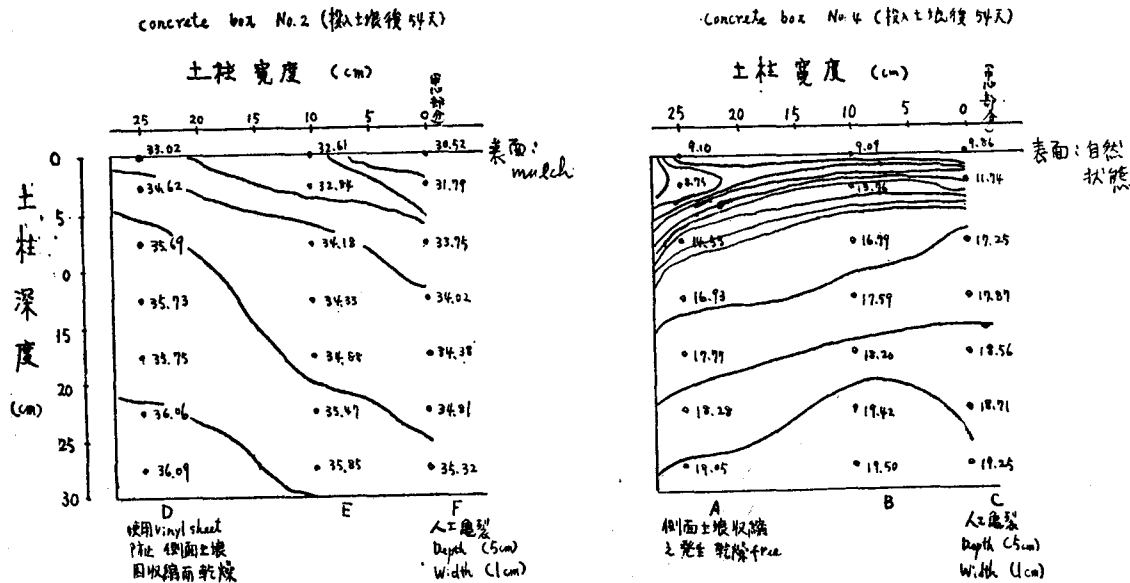


圖 3-7 土柱斷面土壤水分分布並水分移動

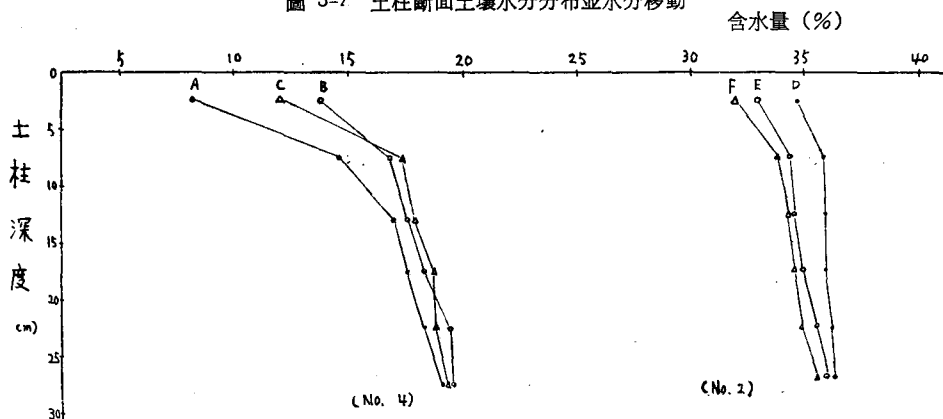


圖 3-8 土柱深度與含水量之關係

## II、粘質水田土壤之收縮機構與舉動之特性

### 一) 粘質土壤收縮之特性

以Concrete box模擬龜裂試驗，做Vinyl cover，防止側面蒸發之有無及在box之中央部做出模擬龜裂而促進蒸發之有無，或者以Mulch而防止從土壤表面出來之蒸發，對於此種乾燥特性已有前述。惟關於從側面而依土壤收縮之龜裂對蒸發特性有何影響，容後述之。對於其在龜裂發生過程粘質土壤之收縮，即收縮之形狀，發展經過，並為觀察其量，以如前圖2-5之裝置，於溫室內以Concrete box裝填粘質土壤，觀測Concrete box壁之土壤收縮情形。

將粘質土壤填入Concrete box後兩日內，雖呈浸水狀，之後任其乾燥，再過七天，即能做龜裂之測定。當時供試體之平均含水量為46.8%而其土壤內

面以電氣推定測定，在深度為5cm處有效水分值之85.50% (PF 1.8) 及深度15cm之地點有效水分值89.25% (PF 1.8)，收縮量之大小平均為1.62mm。惟於53天後(即土壤乾燥，收縮發生後46天時)之收縮寬度，則發展成為：Concrete box模擬龜裂試驗No.1, No.2, No.3, No.4等，各平均為11.45mm, 12.70mm, 14.71mm, 15.32mm。

粘質土壤(臺灣大學實驗農場)之土壤收縮與經過時間並及含水量之關係即如下圖(4-1)，圖(4-2)。

粘質土壤之收縮量隨時間之增加而遞增，其值約與乾燥曲線相類似，其收縮之經過可分為四個階段：即恆率(Steady shrinkage)，減率(Unsteady shrinkage)，恆率，減率之特性。如Concrete box No.1, No.2，因於試驗第29天時，加以Mulch，則土壤之收縮全無進展，但其他如No.3, No.4在

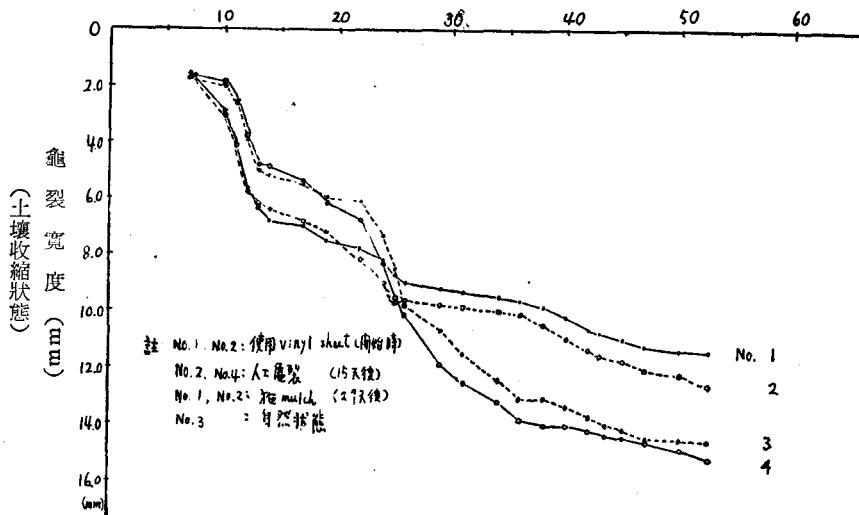
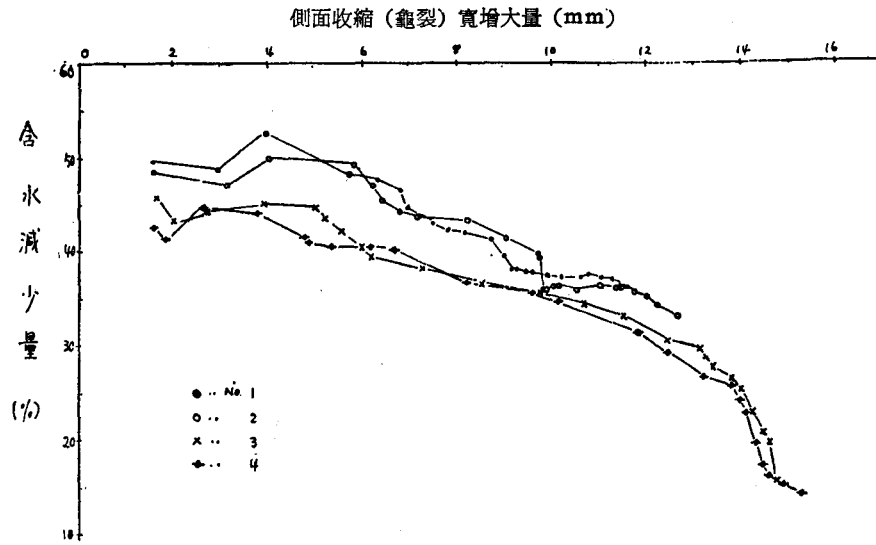


表 4-1 收縮限界室內試驗

1972年4月28日

調查項目 土壤種類	濕度重 (W)	乾土重 (Ws)	含水量 (Wi)	濕潤土積 (V)	乾燥土積 (Vo)	收縮體積 (V-Vo)	收縮限界 (ws)	收縮比 (R)	體積變化 (C)	線收縮 (Ls)	土粒子比重 (Gs)
	g	g	%	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	%			%	
1	24.5957	16.6140	48.04	14.52	10.75	3.77	25.39	1.549	35.085	9.95	2.558
2	25.4555	17.1740	48.22	14.60	10.99	3.61	27.24	1.566	32.855	9.36	2.725
3	24.8005	16.4055	51.17	14.40	11.03	3.37	30.67	1.490	30.545	8.78	2.747
4	24.6250	16.2880	51.18	14.40	10.83	3.57	29.31	1.507	32.958	9.39	2.696
5	25.4095	17.1860	47.85	14.60	9.99	4.61	21.07	1.724	46.169	11.90	2.710
6	24.7540	16.7200	48.05	14.60	9.67	4.93	18.62	1.733	51.002	12.65	2.558
A	81.90	55.36	47.94	49.20	38.30	10.90	28.30	1.448	28.439	8.05	2.451
B	81.85	54.11	51.27	49.50	38.10	11.40	30.24	1.423	29.926	8.50	2.494

試料: 1, 2 農工系溫室實驗土壤 3, 4 農工系圃場 5, 6 桃園 A, B 溫室及圃場

該時間中之收縮率仍呈直線狀。如於收縮過程，探討其龜裂速度與含水量之關係，則顯示出在收縮之初期變化激烈，當收縮度達 4.0mm 以上之寬度時，其收縮仍呈連續性之恒率收縮，但 No.1, No.2 可能因 Mulch 之關係，含水量約在 33% 時則被中斷。No.3, No.4 約於含水量 25% 時，才顯示減率收縮之型態。

依照收縮限界試驗 (表 4-1)，顯示收縮限界約 25.39%，及 27.24%，收縮限界大約在試驗開始後 36 天 (No.4) 至 43 天 (No.3) 時達到。可知當時之收縮量大約為 13.2mm (No.4) 及 13.8mm (No.3)。

## 二) 粘質土壤收縮量和龜裂量之測定

將供試土壤裝入模擬龜裂試驗之 Concrete box 及 Lysimeter 中，於 53 天 (Concrete box) 及 39 天 (Lysimeter) 後分別測定其收縮量。其結果如下：

### 1) Lysimeter 模擬龜裂試驗：

① Lysimeter 內濕土體積 ( $V \text{ cm}^3$ ) =  $90 \times 216.5 \times 20.7 = 40.33 \times 10^4 \text{ cm}^3$

② 收縮後之供試體土壤體積 ( $V' \text{ cm}^3$ ) =  $85.6 \times 212.9 \times 18.3 = 33.35 \times 10^4 \text{ cm}^3$

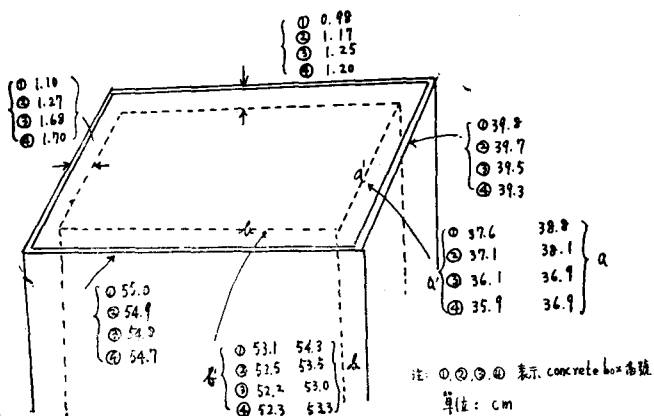
③ 收縮體積 ( $v \text{ cm}^3$ ) =  $40.33 \times 10^4 - 33.35 \times 10^4 = 6.98 \times 10^4 \text{ cm}^3$

④ 依側面收縮之體積變化率 (%) =  $\frac{6.98 \times 10^4}{40.33 \times 10^4} \times 100 = 17.31\%$

⑤ 容積收縮率 (%) =  $\frac{6.98 \times 10^4}{33.35 \times 10^4} \times 100 = 20.94\%$

此容積收縮中，並不包含龜裂之存在，為測定其龜裂量 (龜裂體積)，於 Lysimeter 中放水求出全收縮量。

⑥ 放水之容積 (cc) (= 全收縮體積) =  $10.30 \times 10^4 \text{ cc}$



⑦ Lysimeter 內全龜裂體積 ( $\text{cm}^3$ ) =  $10.30 \times 10^4 - 6.98 \times 10^4 = 3.32 \times 10^4 \text{ cm}^3$

⑧ Lysimeter 內全收縮變化率 (%) =  $\frac{10.30 \times 10^4}{40.33 \times 10^4} \times 100 = 25.54\%$

⑨ 全容積收縮率 (%) =  $\frac{10.30 \times 10^4}{33.35 \times 10^4} \times 100 = 30.88\%$

⑩ Lysimeter 內全龜裂率 (%) =  $\frac{3.32 \times 10^4}{40.33 \times 10^4} \times 100 = 8.23\%$

⑪ 全龜裂容積率 (%) =  $\frac{3.32 \times 10^4}{33.35 \times 10^4} \times 100 = 9.94\%$

因此可知；Lysimeter 內之粘質土壤全容積收縮率為 30.88%，而其龜裂容積率佔全體積之 9.94%。

同時在試驗過程中觀察，在溫室內於第 36 日，自然乾燥之樣本已呈白色，並可吸收些微塗料，同時根據王明光與洪崑煌<sup>(42)</sup> 二氏以 X 光線與化學分析之結果判明其粘土主成分為伊來石 (Illite)。本試驗收縮全容積高達 30% 以上，可能為 Lysimeter 之深度太淺，側面或底面 Concrete 因太陽輻射能直射增加乾燥之故。

Lysimeter 內之 Cylinder 實驗結果如下：

① 土壤在圓筒中原體積 ( $V \text{ cm}^3$ ) =  $16.25^2 \pi \times 20.7 = 17.16 \times 10^3 \text{ cm}^3$

② 收縮後土壤之體積 ( $V' \text{ cm}^3$ ) =  $15.9^2 \pi \times 18.5 = 14.69 \times 10^3 \text{ cm}^3$

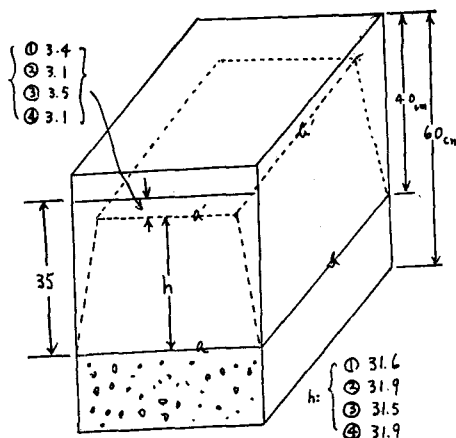
③ 收縮體積 ( $v \text{ cm}^3$ ) =  $17.16 \times 10^3 - 14.69 \times 10^3 = 2.48 \times 10^3 \text{ cm}^3$

④ 收縮比率 (%) =  $\frac{2.48 \times 10^3}{17.16 \times 10^3} \times 100 = 14.44\%$

⑤ 容積收縮率 (%) =  $\frac{2.48 \times 10^3}{14.69 \times 10^3} \times 100 = 16.87\%$

### 2) Concrete box 模擬試驗

將收縮後之土壤從 Concrete box 取出而測定其結果，示如下圖。





此時即成立為 Obelisk 型，如下式： $V = h \{(2a+a')b + (2a'+a)b'\} \times \frac{1}{6}$ ..... (4-1)  
 結果如下：

資料 No.	計算值 No.	濕潤土壤體積	收縮後之體積	收縮體積	收縮變化率	收縮容積率
		$\times 10^3(\text{cm}^3)$	$\times 10^3(\text{cm}^3)$	$\times 10^3(\text{cm}^3)$	(%)	(%)
Concrete box	1	76.62	64.83	11.79	15.39	18.19
	2	76.28	63.57	12.71	16.66	19.99
	3	75.76	60.48	15.28	20.17	25.27
	4	75.24	61.31	13.93	18.51	22.72

### III、粘質水田土壤之龜裂現象與其特性

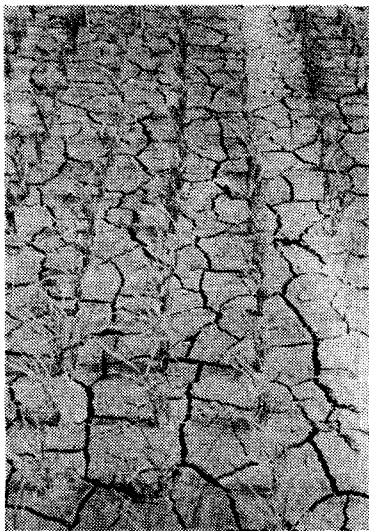
#### 一) 水田中可發現之龜裂，其一般性形態與分類

臺北，桃園，臺南等地區之龜裂實態，其一部分以照片揭示。就各種土壤，以實驗調查龜裂之發生形狀，龜裂之特性與立體的形狀，調查結果關於其形狀則如圖 (5-1)。在平面上，龜裂之形狀，大致可分為；①簡單分枝深裂型 (即主龜裂) ②複雜分枝淺裂型 (即支龜裂及網龜裂) 兩種。

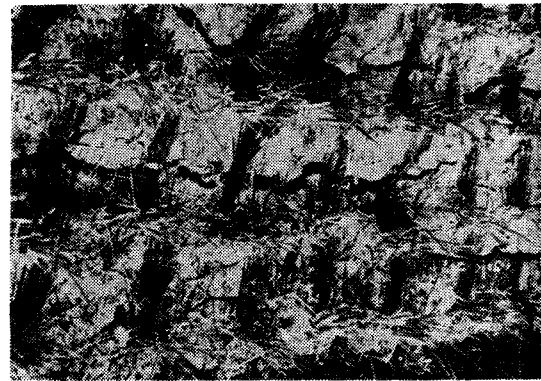
簡單分枝深裂型指龜裂之寬在其發生之最後過程

為 10mm 以上者。主龜裂與支龜裂之區別困難，因為寬之大小差別難以認出。支龜裂與網龜裂寬度為 10mm 以下。支龜裂之先端在主龜裂之近旁，與主龜裂有關連，而且主龜裂與支龜裂之寬比為 1.5 以上者，則完為複雜分枝淺裂型。

臺大農場，即屬於①，桃園則屬於②。又臺南縣之新營，學甲兩地區，其濕潤土壤，大部分均為主龜裂之分布，其龜裂之寬，深度等，因比臺大的大，乃可認為屬於①。



桃 園



臺 北

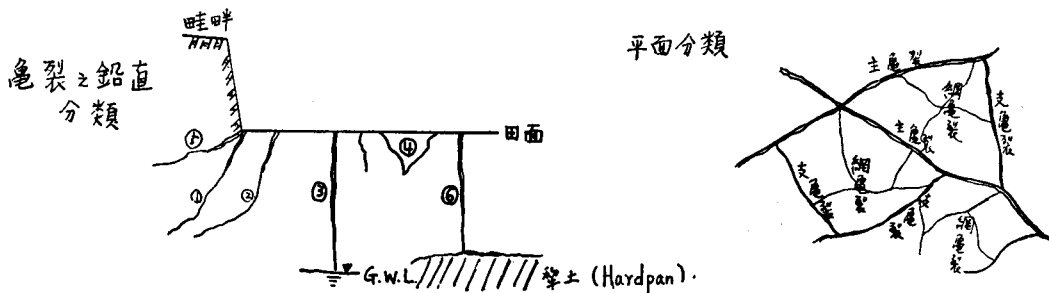


圖 5-1 龜裂之鉛直分類與平面分類

龜裂之垂直面如圖 (5-1)。可分為：①由田埂與田面之境界處向外部漸漸下降者 (Concrete 田埂之時，即 Concrete 與田面之間)；②從田面發生，而其末端潛入田埂下面，向外部消失者；③於田面各處發生，其末端垂直下方伸入地下水域者；④田面上所發生的龜裂有二條以上，於比較淺之土層相交者，或者，單獨存在，其末端於淺的地方消失者；⑤橫斷田埂者；⑥垂直向下方伸長，在犁土層硬盤上 (Ha-

rdpan) 蔓延者；⑦其他前六項互相交錯形成複雜的裂徑者等等。調查結果，發現臺北與臺南為①，③，④，⑥型最多，桃園為①，④型最多。

其次，為欲明確龜裂內部之形態，於臺大農場實驗區之框內中心處，挖 40cm (長)×10cm (寬)×5cm (深) 小溝，投入塗料 (油漆加石膏) 再挖成長達 80cm 深度 50cm 左右之鉛直面。作成斷面圖 (5-2)。

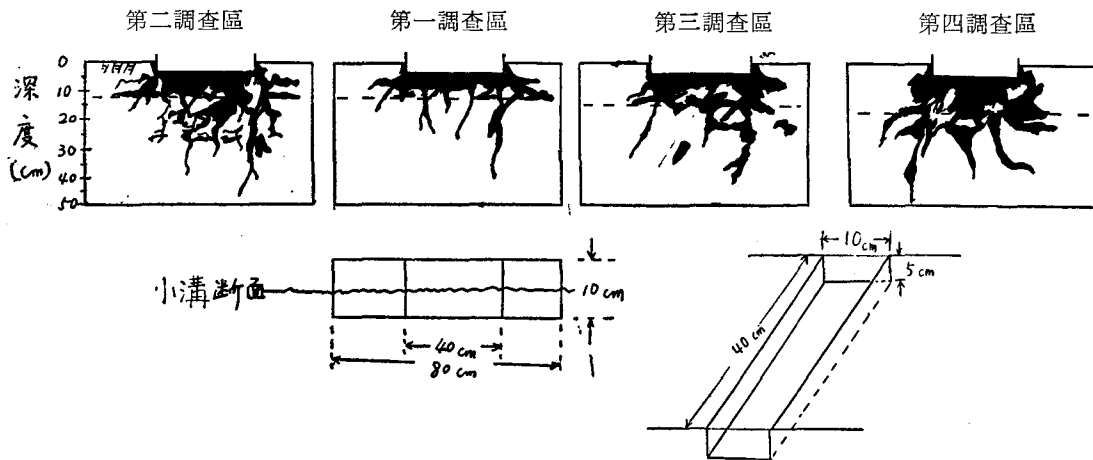


圖 5-2 龜裂內塗料 (石膏+白色 Paint) 之浸入狀況於：臺大農工系圃場

依照此法，在第一調查區，有二種：①於深度 10cm 之處，在硬盤上蔓延者，②垂直伸延，其先端深度達 40cm 左右，且伸延至地下水域者。

第二調查區，龜裂之面積比較大，有在 10cm 附近之第一硬盤及 27cm 附近之第一硬盤上蔓延者，其中亦有通過二、三硬盤，伸延至深度 50cm 左右之附近者。

第三調查區，大致與第二調查區相同，僅證實土

壤中有龜裂之窟窿，或於深度 15cm 至 20cm 之處有耕盤。

第四調查區，幾乎都在硬盤上蔓延之狀態，有的即垂直伸至約 50cm 附近，達到地下水域。

如上所述，在臺北的調查區，則可證實大部分多為上述③，④，⑥項之分布。再者，塗料用油漆 (加入石膏) 投入之時，龜裂之土壤表面上狀態，則如表 (5-1)。

表 5-1 龜裂調查

1971. 2. 5 於臺大農工系圃場

調查項目	調查區別	第一調查區	第二調查區	第三調查區	第四調查區
塗料大致全面性浸入之深度 (cm)		8	8	10	16
每 1.0cm 寬以上之龜裂數		3	5	4	4
最大龜裂之長度 (cm)		80	96	68	102
最大龜裂之寬度 (cm)		1.5	1.7	2.5	1.6
平均龜裂寬度 (cm)		1.12	1.40	1.52	1.32
最大龜裂深度 (cm)用鐵線實際測量 (平均)		16.1	16.1	20.4	23.2
平均龜裂深度 (cm)用鐵線實際測量 (平均)		11.10	15.12	13.88	17.46
龜裂之形狀		線狀型 T型	線狀型 T型	線狀型 T型	線狀型 T型

在臺灣大學農場，龜裂寬平均為2.0cm-3.0cm，有些竟達 4.0cm 以上，至於深度，即平均由 10cm 到 20cm。在桃園內壢實驗農場，平均龜裂寬 1.0cm-1.5cm 左右，平均深度由 5.0cm 至 10.0cm，雖然並不發達，但其量甚多，大多為蜂巢狀網龜裂之分布。臺南之情況，即大致與臺大農場相似之形狀。

## 二) 龜裂之性質

### 1) 龜裂現象之發生過程

龜裂之發生移動與發展之特性，大都受土壤之粒徑，粘着性，土壤含水量，以及影響土壤乾燥之氣象要素等所支配。

于臺大農場野外試驗有關龜裂發生時之含水量與龜裂發展經過，調查之結果，得悉粘質水田土壤水分即在水分甚多階段時，仍然發生龜裂現象。土壤表面，於排水後乾燥至 PF 1.6-PF 1.7 時，則發生單獨小龜裂，惟大部分均不再發展，而形成網形龜裂。

其次，至 PF 1.8 左右時，則又重新發生龜裂，此種龜裂則隨着乾燥之進行而迅速發展，形成龜甲(Tortoise shell) 狀之龜裂，而且大部均成爲主龜裂，且主龜裂漸次擴大。此種情形，即以前者作爲第一次龜裂，後者作爲第二次龜裂。今將龜裂剛發生後之龜裂大小與含水量之關係列於下表 (5-2)。第一次龜裂平均含水比爲 46.89% (PF 1.7)，第二次龜裂在第一次發生後之翌日，其平均含水比則爲 44.28% (PF 1.8)。總之，大部分土壤在含水比超過45%左右(PF 1.8)之高含水量時，仍然發生龜裂現象。

此種情形，由 Lysimeter 模擬龜裂試驗，亦獲得大致同樣之結果。惟根據收縮試驗，粘質土壤之水平方向收縮，差不多在 PF 1.8 或 PF 2.0 時才開始，故得悉影響龜裂發生之含水量，大致上均近於此數。

表 5-2 龜裂剛發生後之大小與含水量之關係

調查方法	發生階段 調查區別 項目	第一次 龜裂 時			第二次 龜裂 時		
		龜裂深度 (cm)	龜裂寬度 (cm)	含水量 (%)	龜裂深度 (cm)	龜裂寬度 (cm)	含水量 (%)
臺大圃場	第一調查區	3.53 (8.37)	0.57 (1.23)	46.31 (44.63)	2.05 (2.60)	0.35 (0.60)	42.50 (41.57)
	第二調查區	4.13 (11.17)	0.47 (1.23)	46.60 (45.40)	3.40 (7.55)	0.45 (0.95)	45.00 (44.02)
	第三調查區	4.70 (11.70)	0.60 (1.20)	45.02 (44.43)	2.15 (3.20)	0.35 (0.65)	44.10 (43.32)
	第四調查區	5.30 (9.43)	0.60 (1.37)	49.63 (48.55)	3.70 (7.30)	0.45 (1.05)	45.51 (44.91)
	平均	4.42 (10.17)	0.56 (1.26)	46.89 (45.75)	2.83 (5.16)	0.40 (0.81)	44.28 (43.46)
溫室內 Lysimeter	龜裂區						
	No. 1-No. 5	3.40	0.42	55.26	5.83	0.63	44.71
	No. 8-No. 14 (平均)	(7.14)	(0.82)	(47.10)	(10.13)	(1.09)	(43.27)

註：( ) 表示龜裂發生後一天之調查

龜裂剛發生後，以直尺及鐵線測定其深度與寬等之結果，第一次龜裂，平均深度爲 4.42cm，寬爲 0.56cm；第二次龜裂，平均深度爲 2.83cm，寬爲 0.40cm，大約於 24 小時之後，平均深度 10.17cm，寬 1.26cm，在第二次龜裂變成深度爲 5.15cm，寬 0.81cm，其速度非常快。

第一次龜裂，於值 PF 1.6 至 PF 值 1.7 左右高含水量時，開始發展。其主要原因，可認爲在水分甚多之階段下，由於土壤內因脫水而引起土壤水之移動，土壤中存在有媒介物之孔隙，土壤壓縮之歪斜等等，而引起不均之應力所發生者。故依據這種龜裂之發生，可認爲這種應力在一度被緩和之後，其龜裂現象即與均一之粘質土壤情形相似，於 PF 1.8-2 左

右之水分量時，第二次龜裂則開始發生並逐漸發展。

### 2) 龜裂現象之發展過程與一般性質。

上述所記載，龜裂發生後，其發展非常迅速。爲欲明瞭有關龜裂生長之發展過程，茲將野外試驗及 Lysimeter 模擬龜裂試驗之結果，列於下圖 (5-3) (5-4), (5-5)。有關龜裂之伸長，則比其寬，深度來得更迅速，龜裂發生後，大致由兩天至四天即結束。由此可見龜裂長度對土壤乾燥之影響不大。故龜裂之發展過程，應用龜裂之寬度和深度表示之。

龜裂之寬與時間關係，可作成拋物線，又深度與時間，也可作成同樣之圖。

在 Lysimeter 試驗中之龜裂發展，龜裂寬度於五日後達到最終龜裂之50%，十日後到75%，十五日

後到85%以上。於農場試驗所得者亦然。惟測定開始後第六、七、八天有少許雨量，第九、十天則下了約40mm之雨量，故不能測定。

降雨對於龜裂寬之影響甚大。即使少許之雨量，

亦可使土壤立即膨脹，使龜裂寬度立即減小。但對深度影響不大。其次，在第九、十天時所下之雨，則影響甚大，由於土塊之流出，龜裂深度平均變淺3cm-4cm左右。

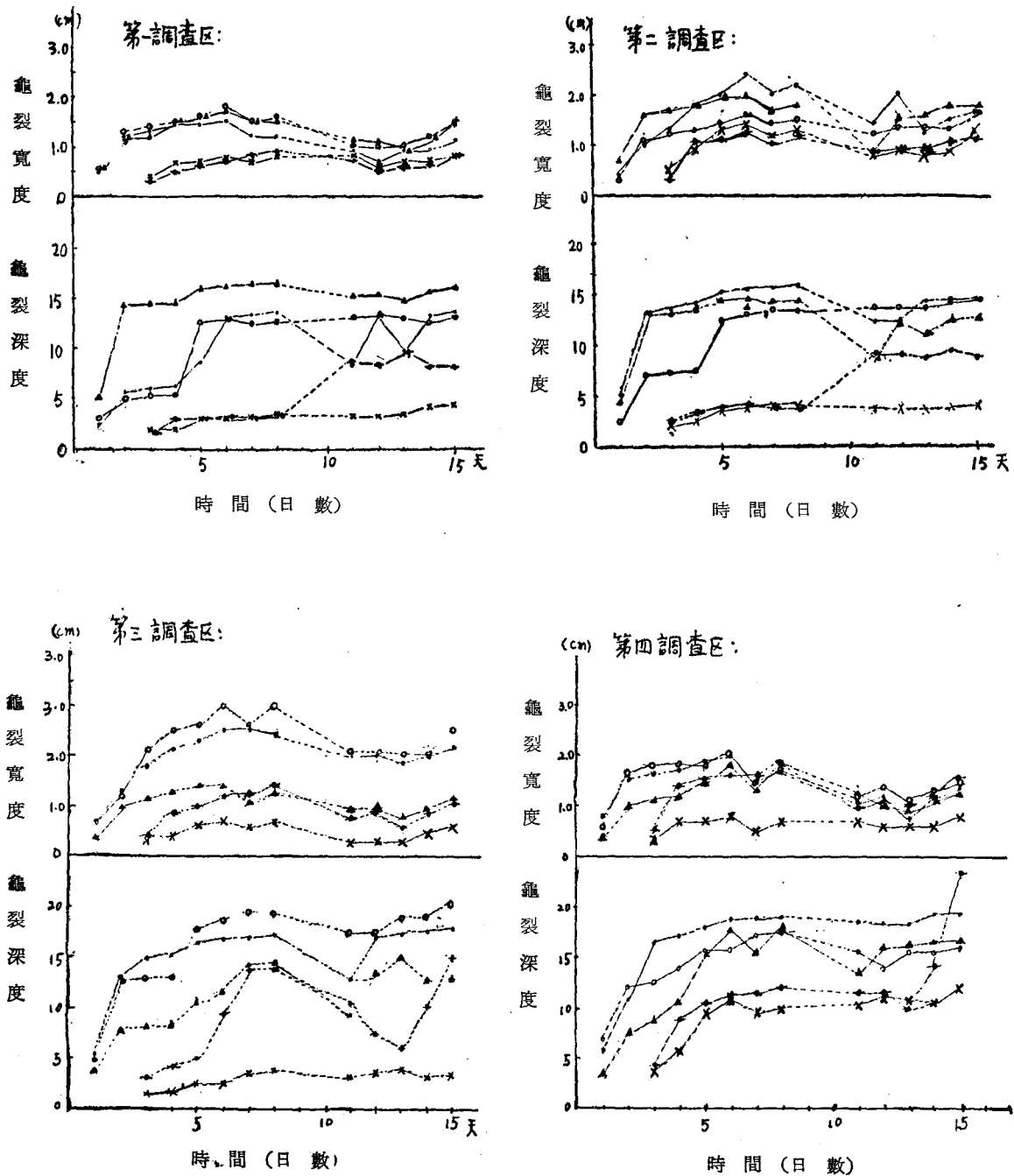


圖 5-3 龜裂之發展狀態 (於臺大農工系圃場調查)

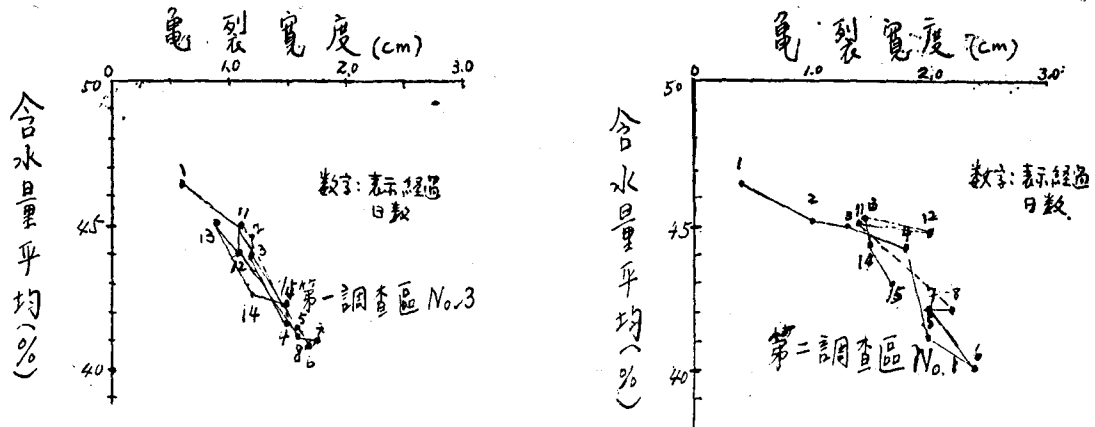


圖 5-4 龜裂寬度之擴張與含水量之關係 (於臺大農場)

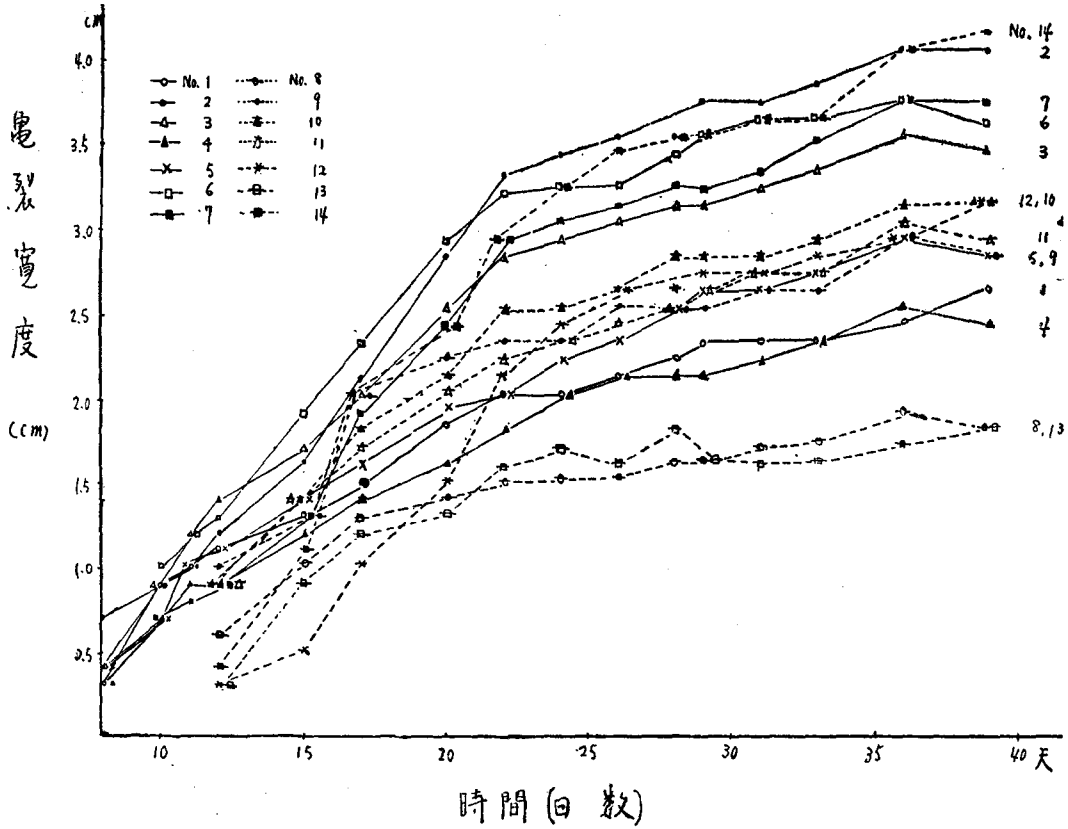


圖 5-5 龜裂之擴張狀態 (Lysimeter test)

關於龜裂發展與經過時間之關係曲線，杉氏<sup>(45)</sup>並後藤氏<sup>(46)</sup>等認為伸長與時間之關係，可以下式代表：

$$\text{即 } C_L = \frac{T}{a+bT} \dots\dots\dots (4-2)$$

$C_L$ : 龜裂長 (mm)

$T$ : 時間 (min)

$a, b$ : 常數，(由土壤及氣象因子決定)

又關於龜裂寬之大小可以下式代表：

$$C_w = a'T^{b'} \dots\dots\dots (4-3)$$

$C_w$ : 龜裂寬 (mm)

T: 時間 (min)

a', b': 常數

由圖 (5-5), 顯示, 龜裂發生後, 第十天以前為非常緩慢之曲線。又根據圖 (5-3), 龜裂之深度依其寬之增大而加深。關於此點, 更可見於下圖 (5-6), (5-7), (5-8)。

關於龜裂之形狀, 依土性, 乾燥條件及乾燥經過之時間而變化。在臺大農場, 沿著稻株行間伸長成線

狀者, 大多為線狀型及 T 型。在 Lysimeter 模擬龜裂試驗, 不知是否因無稻株行間之關係, 大多為三叉型而成長橢圓形板狀型。

由龜裂之寬 ( $C_w$  cm) 與深度 ( $C_D$  cm) 之關係, 得兩者之間成立一非常密切之關係。

$$C_D = \alpha C_w + \beta \dots\dots\dots(4-4)$$

此即意味龜裂之長度當作常數來處理, 則龜裂數量 (龜裂內土壤壁面積) 可依土壤表面上所呈現之龜裂寬 (即經過之時間函數) 來表示。

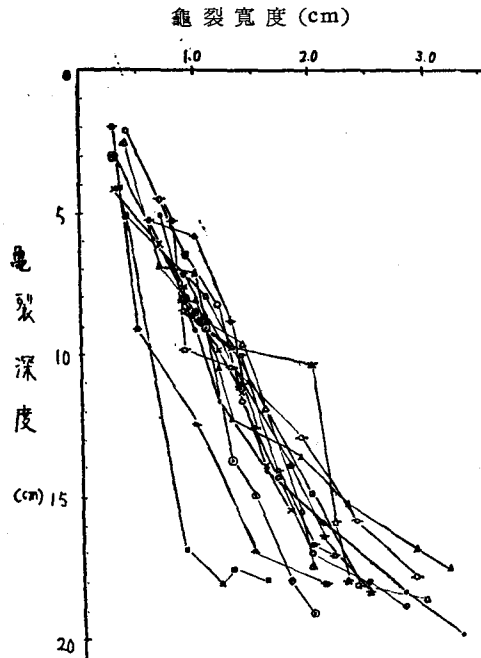


圖 5-6 龜裂寬度與深度之關係 (溫室 Lysimeter 試驗)

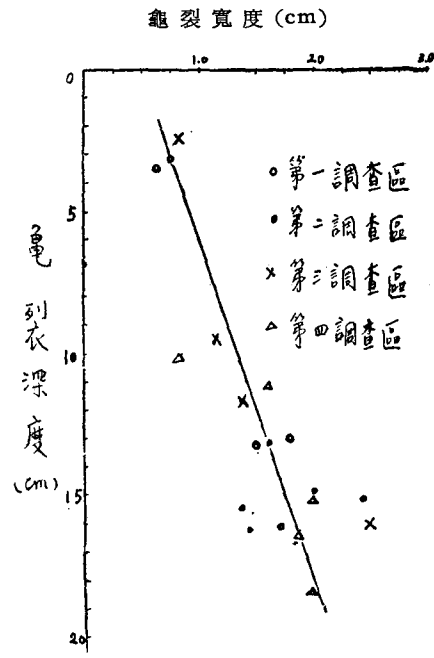


圖 5-7 龜裂寬度與深度之關係 (田場試驗)

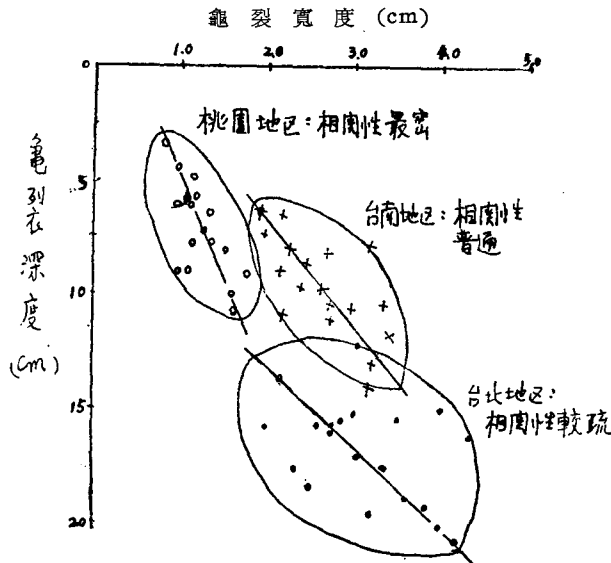


圖 5-8 龜裂深度與寬度之相關圖

### 3) 龜裂數量之表示

在研究龜裂時，土壤經數日之乾燥後，無妨將龜裂長度當作常數來處理。根據圖(5-6), (5-7), (5-8)之結果，龜裂寬與深度成正比，若欲表示龜裂之數量（龜裂在土壤表面上所佔之面積，龜裂內土壤表面積，龜裂內容積等等）時，正如前述，可由土壤龜裂之寬度代表之。

於臺大實驗農場上，選定四個 100cm×100cm 區劃處，作為試驗區 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, 各別於其中設定 25cm 方格形狀之測線（見圖 5-9），經過一段時間後測定，總計其中之龜裂。上寬約 1 cm 以上的龜裂與龜裂內部蒸發有關，故依下式，可求有關蒸發之龜裂量。

$$P_{1cm}(\%) = \frac{\text{測線上寬 1.0cm 以上之龜裂所占有寬之合計}}{\text{測線上全龜裂所占有寬之合計}} \times 100 \quad (4-5)$$

有關蒸發的龜裂量之經時變化如下之關係式：

$$P_{1cm} = a \log\left(\frac{T}{24}\right) + b \quad (4-6)$$

T: 經過日數

a, b: 常數（依氣象及土壤條件決定）

此情形 a=69.55      b=-56.51

其次，於區劃中測定龜裂之最大寬度（C<sub>w max</sub> cm），與 P<sub>1.0</sub> 對比，此兩者之間，於圖（5-10）所示結果成立下式。即得關係式：

$$P_{1.0} = a' C_w \max + b' \quad (1.0 \leq C_w \max \leq 4.2) \quad (4-7)$$

a', b': 由氣象·土壤條件來決定

a'=34.6,      b'=7.5

此即表示，於大致均質粘土壤水田，其水田特性可將龜裂之數量用龜裂寬（尤其最大龜裂寬）來代替。

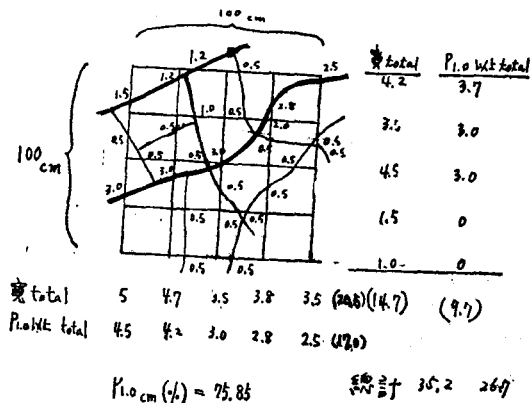


圖 5-9 龜裂之集計方法 (例) Lysimeter

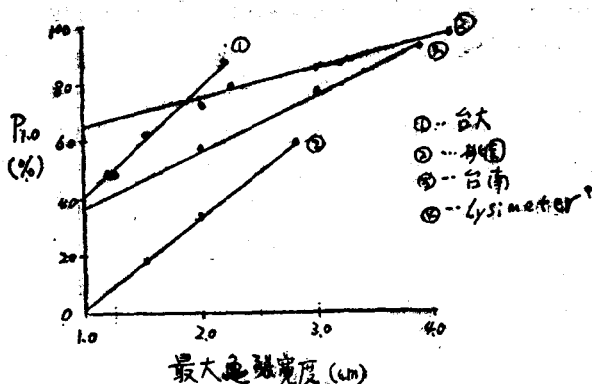


圖 5-10 最大龜裂寬度與 P<sub>1.0</sub> (%) 之關係

在臺大農場，龜裂之情況不多，惟其龜裂寬度甚大。反之，桃園地區，則發生甚多小龜裂，其分布甚平均，為大致寬 1.0cm 之龜裂，其值甚小。上圖即為欲明瞭目前龜裂之分布狀態與其發展狀態所作之圖案。

### IV、於龜裂內部之蒸發機構

為了調查龜裂內部蒸發實際如何進行，如圖（2-5）所示，首先造出幅面 5cm，深度 40cm 之 V 字型模擬龜裂（Concrete box No. 1, No. 2, No. 3）。然後於龜裂內部作有關乾燥與蒸發量之各種試驗，全部於溫室內進行。發現影響龜裂內部之蒸發因子為：①龜裂內部空氣之相對濕度②龜裂面母體土壤之含水量與土壤溫度③日射量與氣溫等。以上三個因子，均可用飽差（Saturation deficit）代表。因此，依照龜裂內部飽差之垂直分布，可知龜裂內部各深度之蒸發量之大致情形。

#### 一) 龜裂之幅面及深度與飽差之關係

在上述模擬龜裂實驗中，因認為內部飽差影響之

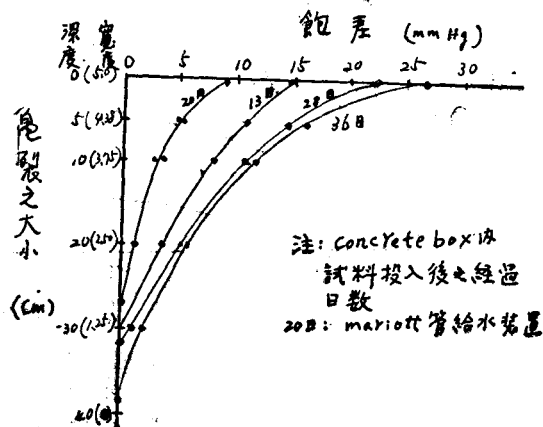


圖 6-1 龜裂之大小與飽差之關係

主要因子是龜裂壁附近的土壤含水量，因此將大約含水量60%之飽和土壤裝入 Concrete box 中實驗，而後於不同之龜裂壁之乾燥狀態下，求出飽差量之垂直分布。此時須檢定 Concrete box 內之土壤條件及環境條件，並於模擬龜裂內中央部，在各種不同之深度中吊起一小型乾濕溫度計作測定。其結果見圖(6-1)。由圖(6-1)可見龜裂之大小隨飽差而變化，又飽差隨深度之增大而顯著減少，換言之，即蒸發隨深度之增加而受阻礙。

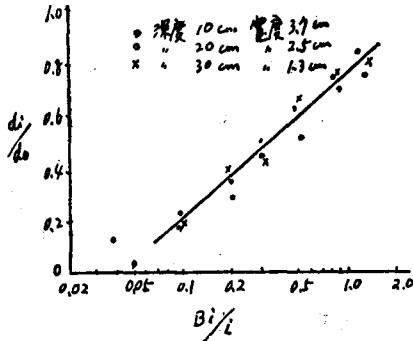


圖 6-2 龜裂內飽差比與寬度/深度之關係

飽差與龜裂之關係如圖(6-2)所示。圖中之  $d_0$  代表土表面之飽差，以 mm Hg 為單位；圖中之  $d_i$  代表土面下  $i$  cm 處之飽差，也以 mm Hg 為

單位。  $B_i$  (cm) 為龜裂寬度，  $i$  (cm) 為深度。則  $d_i/d_0$  與  $B_i/i$  之關係可以下式表示：

$$d_i/d_0 = \alpha \log (B_i/i) + \beta \dots\dots\dots(4-8)$$

$\alpha, \beta$ : 由周圍之土壤條件而定，由本實驗得  $\alpha=25, \beta=39$

由圖(6-2)可見  $d_i/d_0$  與  $B_i/i$  之 Correlation 很高。

若關於龜裂內部之蒸發，其土壤條件及環境條件相同時，則龜裂之大小(同樣深度之寬度與深度比)與飽差有密切關係。因此，龜裂內之淺處飽差愈大，土壤之蒸發量也增大。因此，在龜裂內乃是依其深度與飽差之差別而進行蒸氣態之水分移動。

二) 龜裂內之乾燥

前述 Concrete box 模擬龜裂之土壤供試體，於裝入 Concrete box 後，經過 13日，18日，36日，於龜裂中央部如前記圖(2-5)所示，將飽和土壤各約10g 在龜裂內部深度 5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm 處吊起，從該土壤之深度差別比較其乾燥蒸發量。又在試驗期間，因考慮此等供試體之乾燥變化，故為了讓土壤含水量經常保持在30%左右，用 Mariott 管給水裝置繼續不斷供水，然後將此種模擬龜裂試驗之試料乾燥蒸發量，加以比較，其結果如下圖(6-3) (No. 1, No. 2, No. 3-1, No.3-2)。

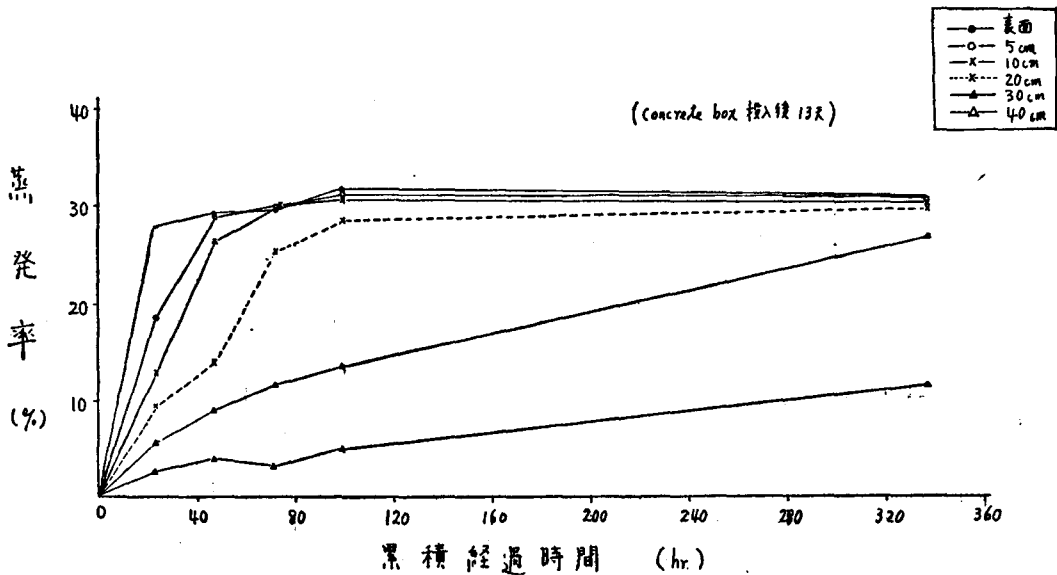


圖 6-3 龜裂內面深度別之乾燥蒸發量比較試驗 No. 1

1972年3月18日~4月2日

臺大園場，溫室內模擬龜裂實驗



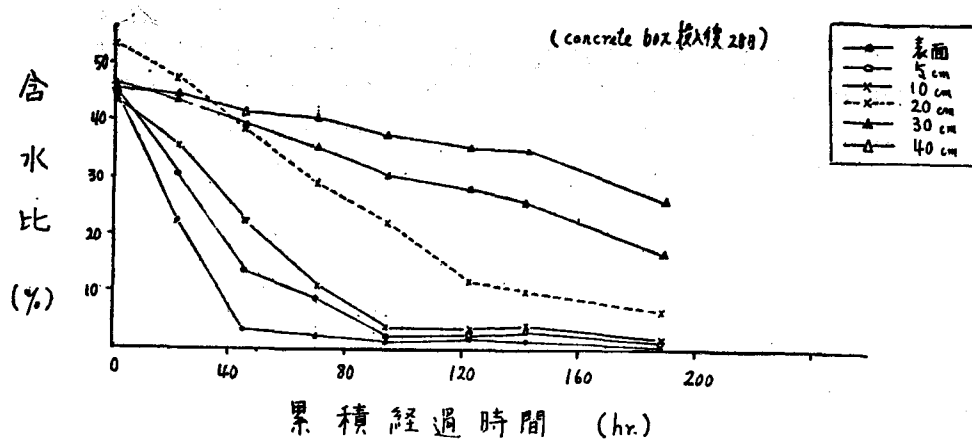
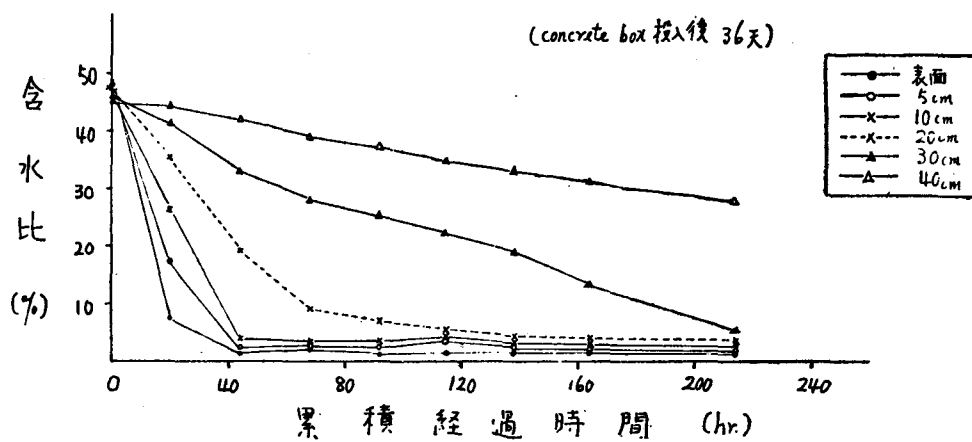
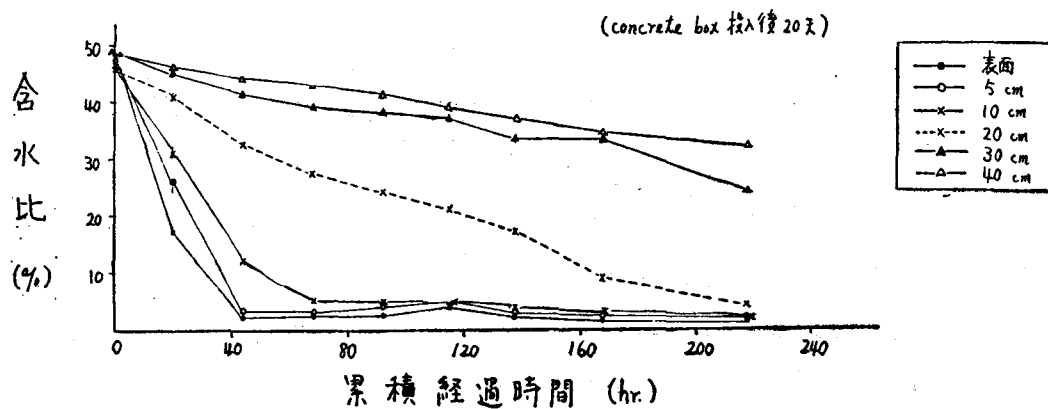


圖 6-3 龜裂內面深度別之乾燥蒸發量比較試驗 No. 2  
1972年 4月 2日 ~ 4月 10日  
臺大園場，溫室內模擬龜裂實驗



龜裂內面深度別之乾燥蒸發量比較試驗 No. 3-1  
1972年 4月 2日 ~ 4月 10日  
臺大園場，溫室內模擬龜裂實驗



龜裂內面深度別之乾燥蒸發量比較試驗 No. 3-1  
1972年 4月 10日 ~ 4月 19日  
臺大園場，溫室內模擬龜裂實驗

又試驗 No. 1 (第 13 日) No. 2 (第 28 日) No. 3 (第 36 日) 係在同樣 Concrete box No. 1 模擬龜裂內，而 No. 3-2 即主要成分保持於濕土壤(含水量約 30% 左右) 狀態下進行試驗。

在 No. 1 之情況下，經過時間與水分蒸發損失率以  $\left(\frac{\text{試料全包括水分量}}{\text{試料全濕重量}} \times 100\right)$  表示之。依此方法，得知試驗所用之試料含水率  $\left(\frac{\text{濕土內全水分量}}{\text{濕土重}} \times 100\right)$  大致為土重之 31% 至 32%。實驗開始後第一日 (23 小時 30 分鐘) 之蒸發量在表面上蒸發率 28.04% 為全水分量之 87.7%。其次，於經過時間 47 小時後，表面與深度 5cm 之試料，其累積蒸發率為 29.71%，與 29.69% 其乾燥速度大致相同。於 72 小時後，表面與深度 5cm, 10cm 之試料，其累積蒸發率各別為 29.80, 29.88, 29.94%，顯出大致相同之蒸發率，而且蒸發各試料全水分量之 93.2%，95.3%，97.4%，即是在深度 20cm，其累積蒸發率為 25.44%，為蒸發全水量之 82%。

下面，於試驗 No. 2, No. 3-1 及 No. 3-2，以含水量表示試料之蒸發量，將其含水量在不同之時間內加以比較。由 Concrete box 所裝試料之乾燥狀態，因時間長短不同，使得該試料之蒸發乾燥速度亦大有不同。此種情形，在 No. 2 (投入 Concrete box 後第 28 日)，供試體土壤之含水比為 27%。在 No. 3 (同樣後第 36 日) 供試體土壤含水比大致乾燥成 20%，在 No. 3-2 (投入 Concrete box 後第 20 日) 之情形，大致為 35%。故由圖 (6-3)，得知由於供試體土壤含水量之不同，其乾燥特性亦有所變化。

例如，在試驗 No. 2 表面與深度 5cm 處之試料，經過 45 小時 20 分鐘時，其恒率乾燥顯示各含水比達 3.58%，14.77%，在深度 10cm 處，經過 94 小時半，含水比為 4.96% 時，即有減率乾燥之變化點出現。在深度 20cm 之處，經過 122 小時 20 分鐘，含水比 12.48% 為恒率和減率乾燥之變化點。

在試驗 No. 3-2，試料之乾燥更厲害，於表面及深度 5cm 處之試料，經過 24 小時，則達到恒率之變化點，各別含水量為 7.69 及 17.83%。又在深度 10cm, 20cm 處，其乾燥亦比較迅速，各經 44 小時 15 分鐘及 69 小時半，即達到其變化點。

綜合上面各試驗加以比較，則試驗結果如圖 (6-3) 之 (No. 3-2) 之乾燥特性最為緩慢。(參閱表 6-1)

如此由於龜裂壁主要成分含水量之不同，龜裂內蒸發量差別亦甚大。故得悉此種情形與前述之飽差有很大之關係。今將此等試料之蒸發量與飽差之關係，示如下圖 (6-4)。並將飽差 (dx) 與試料蒸發量 (Ey) 之關係作成直線形。

$$E_y = \alpha dx + \beta \dots\dots\dots(4-9)$$

$E_y$ : 試料之蒸發含水比 (wt (%)/hr)

$d$ : 飽差 (mm Hg)

由實驗得  $\alpha = 0.71, \beta = 0.52$

在此種龜裂中，由懸掛起濕土壤所探究之蒸發特性，雖不能作為直接由龜裂內土壤所表現出之蒸發量特性，惟由於與水蒸氣移動有所關連，故將探究龜裂內蒸發特性有很大之益處。

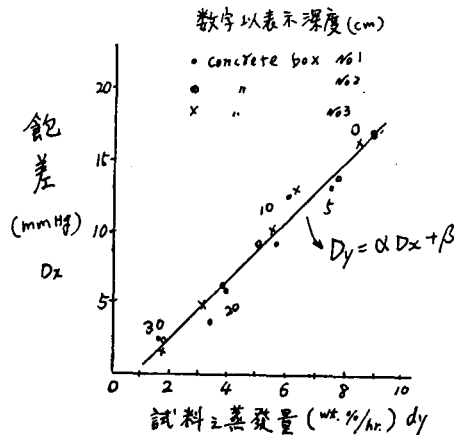


圖 6-4 龜裂內深度別飽差之變化

### 三) 由龜裂內土壤壁面引起之蒸發量與乾燥特性

前述有關龜裂內部之蒸發特性，乃是將濕土壤懸掛於龜裂內，然後由土壤之蒸發量，而間接獲得其乾燥特性。在下面，為得悉龜裂土壤壁面之乾燥特性，採用如圖 (2-5) 之 Mariott 管裝置，根據 Mariott 管上所蒸發損失之水量，而間接得悉其乾燥特性。

在實驗時，於 Concrete box No. 2, No. 3 裝入液性限界狀 (Liquid limit) 之粘質濕土壤，然後在其內部深度 5cm 和 30cm 處，埋設 Mariott 給水玻璃管。玻璃管埋在龜裂壁面內 5cm 處，使其龜裂壁面因水分蒸發而乾燥時，能够由 Mariott 供給水分。吾人可根據其供給量而求出同一條件上的蒸發量之比較。

第一次試驗，於土壤投入 Concrete box 後第 12 日 (box No. 2) 及第 14 日，(box No.3) 由 1972 年 4 月 2 日至 10 日。第二次試驗，土壤投入 Concrete

表 6-1 龜裂內面深度別之乾燥蒸發量比較試驗 No. 1

1972年3月18日~4月2日  
臺大圃場，溫室內模型龜裂實驗

深 度 別	測定日		3月18日		3月19日		3月20日		3月21日		3月22日		3月23日		4月2日	
	測定時刻		16:00		13:00		12:30		12:00		13:20		16:10		13:50	
	累積經過時間		0		21.00		44.30		47.0		72.20		99.10		336.50	
	測定項目		(開始)		0 (開始)		23.30									
	土塊重量	蒸發率	土塊重量	蒸發率	土塊重量	蒸發率	土塊重量	蒸發率	土塊重量	蒸發率	土塊重量	蒸發率	土塊重量	蒸發率	土塊重量	蒸發率
Box No. 1 表面 A	(g) 11.24	(%) 0	8.02	28.65	7.77	30.87										
表面 B	12.74	0	8.17	35.87	7.97	37.44										
表面 C			10.20	0	7.34	28.04	7.17	29.71	7.16	29.80	6.94	31.96	6.99	31.47		
5 cm			10.34	0	8.42	18.57	7.27	29.69	7.25	29.88	7.10	31.33	7.16	30.75		
10 cm			10.42	0	9.00	13.63	7.64	26.68	7.30	29.94	7.22	30.71	7.22	30.71		
20 cm			10.30	0	9.31	9.61	8.84	14.17	7.68	25.44	7.35	28.64	7.23	29.81		
30 cm			10.50	0	9.90	5.71	9.53	9.24	9.26	11.81	9.05	13.81	7.68	26.86		
40 cm			5.50	0	5.32	3.27	5.27	4.18	5.32	3.27	5.22	5.09	4.86	11.64		

備考：

1972年  
3月3日：土壤選定  
(二年前的風乾土壤)

3月4日：土壤調整  
(約液性限界)

3月5日：Concrete box內  
投入

蒸發率：

$$\frac{\text{濕土}-\text{乾土}}{\text{全濕土重}} \times 100 \quad (\%)$$

龜裂內面深度別之乾燥蒸發量比較試驗 No. 2

1972年4月2日~4月10日  
臺大圃場，溫室內模型龜裂實驗

深 度 別	測定日		4月2日		4月3日		4月4日		4月5日		4月6日		4月7日		4月8日		4月10日		爐 乾 燥 土 重
	測定時刻		14:00		12:00		11:20		12:00		12:30		16:20		12:00		11:40		
	累積經過時間		(開始)		22.0		45.20		70.0		94.30		122.20		142.0		189.40		
	測定項目		0																
	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	土塊重量	含水比	
Box No. 1 表面	(g) 10.07	(%) 44.06	8.59	22.89	7.24	3.58	7.18	2.72	7.12	1.86	7.14	2.15	7.16	2.43	7.03	0.57	6.99		6.99
5 cm	10.72	45.26	9.66	30.89	8.47	14.77	8.07	9.35	7.58	2.71	7.57	2.57	7.67	3.93	7.50	1.63	7.38		7.38
10 cm	10.58	44.14	9.94	35.42	9.02	22.89	8.17	11.31	7.66	4.36	7.54	2.72	7.64	4.09	7.48	1.91	7.34		7.34
20 cm	10.71	53.66	10.30	47.78	9.69	39.02	9.04	29.70	8.56	22.81	7.84	12.48	7.73	10.90	7.48	7.32	6.97		6.97
30 cm	10.79	46.40	10.60	43.83	10.28	39.48	9.97	35.28	9.62	30.53	9.45	28.22	9.32	26.46	8.67	17.64	7.37		7.37
40 cm	9.92	45.67	9.82	44.20	9.64	41.56	9.59	40.82	9.39	37.89	9.25	35.83	9.23	35.54	8.97	31.72	6.81		6.81

龜裂內面深度別之乾燥蒸發量比較試驗 No. 3

1972年4月10日~4月19日  
臺大園場，溫室內龜裂模型實驗

深 度 別 (cm)	測定日		4月10日		4月11日		4月12日		4月13日		4月14日		4月15日		4月16日		4月17日		4月19日		爐 乾 燥 土 重
	測定時刻		16:00		12:00		12:15		13:30		12:15		11:45		10:30		12:00		14:00		
	累積經過時間		(開始) 0		時間 20.0 分		44.15		69.30		92.15		115.45		138.30		164.0		214.0		
	測定項目		土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	土塊 重量	含水比	
Box No. 1 表面	10.06	48.82	7.28	7.69	6.86	1.48	6.91	2.22	6.89	1.92	6.89	1.92	6.86	1.48	6.88	1.78	6.87	1.63	6.76		6.76
5 cm	10.80	48.15	8.59	17.83	7.44	2.06	7.47	2.47	7.49	2.74	7.55	3.57	7.48	2.61	7.43	1.92	7.42	1.78	7.29		7.29
10 cm	10.37	48.14	8.87	26.71	7.31	4.43	7.22	3.14	7.25	3.57	7.31	4.43	7.25	3.57	7.17	2.43	7.19	2.71	7.00		7.00
20 cm	10.44	47.88	9.58	35.69	8.44	19.55	7.74	9.63	7.56	7.08	7.47	5.67	7.38	4.53	7.36	4.25	7.29	3.26	7.06		7.06
30 cm	10.59	47.49	10.17	41.64	9.59	33.57	9.21	28.27	9.03	25.77	8.82	22.84	8.57	19.36	8.18	13.93	7.60	5.85	7.18		7.18
40 cm	10.44	45.81	10.38	44.97	10.21	42.60	9.98	39.39	9.84	37.43	9.70	33.47	9.56	33.52	9.43	31.70	9.17	28.07	7.16		7.16
Box No. 2 表面	10.58	48.18	8.36	17.09	7.33	2.66	7.35	2.51	7.38	2.93	7.47	4.18	7.34	2.37	7.28	1.53	7.28	1.53	1.17		1.17
5 cm	10.58	47.56	9.04	26.08	7.44	3.77	7.36	3.08	7.43	4.06	7.54	5.60	7.36	3.08	7.32	2.52	7.34	2.80	7.14		7.14
10 cm	10.56	47.49	9.43	31.70	8.07	12.71	7.53	5.17	7.50	4.75	7.53	5.17	7.44	3.91	7.36	2.79	7.35	2.65	7.16		7.16
20 cm	10.64	42.37	10.18	41.00	9.60	32.96	9.17	27.01	8.99	24.52	8.77	21.47	8.50	17.73	7.93	9.83	7.56	4.71	7.22		7.22
30 cm	10.61	48.39	10.41	45.59	10.15	41.96	9.94	39.02	9.88	38.18	9.80	37.06	9.57	33.85	9.38	33.19	8.88	24.20	7.15		7.15
40 cm	10.67	48.40	10.51	46.18	10.38	44.37	10.29	43.12	10.18	41.59	10.06	39.92	9.90	37.69	9.66	34.35	9.52	32.41	7.19		7.19

Box No. 1

備考： 1972年3月3日 土壤選定（二年前的水田風乾土壤）  
3月4日 土壤調整（液性限界）  
3月5日 Concrete box 內投入

Box No. 2

3月19日 } 土壤選定（二年前的水田風乾土壤）並土壤調整  
20日 }  
3月21日 Concrete box 內投入

使用 Mariott 管 給水 裝置之 蒸發 損失 水量 試驗

1972 年 4 月 2 日-4 月 19 日  
於：臺大農工系圃場溫室內實驗

第一回

測定項目	深度別	測定日		4 月 2 日	4 月 3 日	4 月 4 日	4 月 5 日	4 月 6 日	4 月 7 日	4 月 8 日	4 月 10 日
		測定時刻		14:00	12:00(13:00)	10:30(12:00)	12:00	12:45(13:30)	16:30(17:20)	12:15	11:50(15:40)
		累積經過時間		(開始) 0	22.0(23.0)	44.30(46.0)	70.0	94.45(95.30)	122.30 (123.30)	142.15	189.50(193.40)
累計蒸發損 失水量(cc)	Box No.2	5cm	0	9 (27)	44 (44)	60	72 (72)	92 (93)	110	149(152)	
		30cm	0	5 (6)	13 (15)	22	31 (31)	43 (42)	55	84 (85)	
	Box No.3	5cm	0	15 (19)	51 (15)	81	107(109)	140(140)	163	215 (224)	
		30cm	0	10 (10)	22 (28)	35	50 (52)	72 (72)	94	124 (130)	
一天蒸發損 失水量(cc)	Box No.2	5cm	0	9 (27)	35 (17)	16 (16)	12 (12)	20 (21)	18 (17)	19.5 (21)	
		30cm	0	5 (6)	8 (9)	9 (17)	9 (9)	12 (11)	12 (13)	14.5 (15)	
	Box No.3	5cm	0	15 (19)	36 (36)	30 (26)	26 (28)	33 (31)	23 (23)	26 (30.5)	
		30cm	0	10 (10)	12 (18)	13 (7)	15 (17)	22 (20)	22 (22)	15 (18)	

第二回

測定項目	深度別	測定日		4 月 10 日	4 月 11 日	4 月 12 日	4 月 13 日	4 月 14 日	4 月 15 日	4 月 16 日	4 月 17 日	4 月 18 日	4 月 19 日
		測定時刻		17:00	12:00(13:00)	11:40 (12.50)	12:40(13:30)	12:00(14:00)	11:30(12:10)	10:10(10:50)	11:40(12:30)	12:15	13:30(14:00)
		累積經過時間		0	19.0(20.0)	42.40(43.50)	67.40(68.30)	91.0(93.0)	114.30(115.10)	137.10(135.50)	161.0(161.50)	185.35	210.50(211.20)
累計蒸發損 失水量(cc)	Box No.2	5cm	0	16 (17)	45 (46)	73 (74)	96 (97)	117(118)	143(145)	182(188)	222	255	
		30cm	0	10 (15)	31 (35)	55 (56)	76 (78)	96 (98)	115(116)	148(150)	180	204	
	Box No.3	5cm	0	18 (23)	49 (51)	90 (93)	125(133)	163(164)	195(196)	236(236)	275	319	
		30cm	0	11 (16)	36 (38)	70 (70)	95 (96)	117(124)	143(149)	174(185)	202	229	
一天蒸發損 失水量(cc)	Box No.2	5cm	0	16 (17)	29 (29)	28 (28)	23 (23)	21 (21)	26 (27)	39 (43)	40 (34)	33	
		30cm	0	10 (15)	21 (20)	24 (21)	21 (22)	20 (20)	19 (18)	33 (34)	32 (30)	24	
	Box No.3	5cm	0	18 (23)	31 (28)	41 (42)	35 (40)	38 (31)	32 (32)	41 (40)	39 (39)	44	
		30cm	0	11 (16)	25 (22)	34 (32)	25 (26)	22 (28)	26 (25)	31 (36)	28 (17)	27	

備考：Box No.2 1972 年 3 月 19 日 土壤選定並土壤調整

3 月 21 日 Concrete box 內投入

Box No.3 1972 年 3 月 17 日~18 日 土壤選定並土壤調整

3 月 19 日 Concrete box 投入

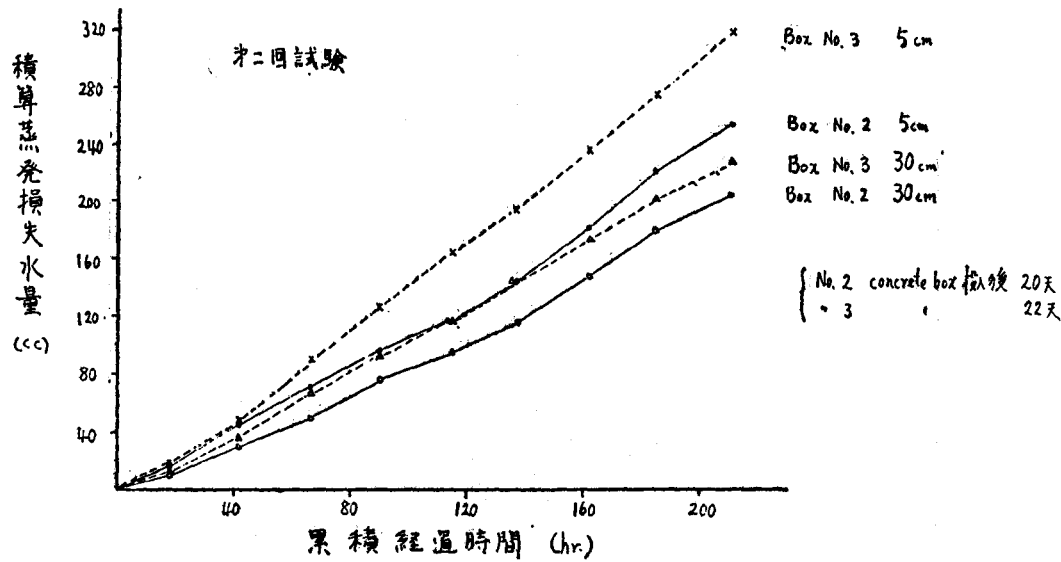
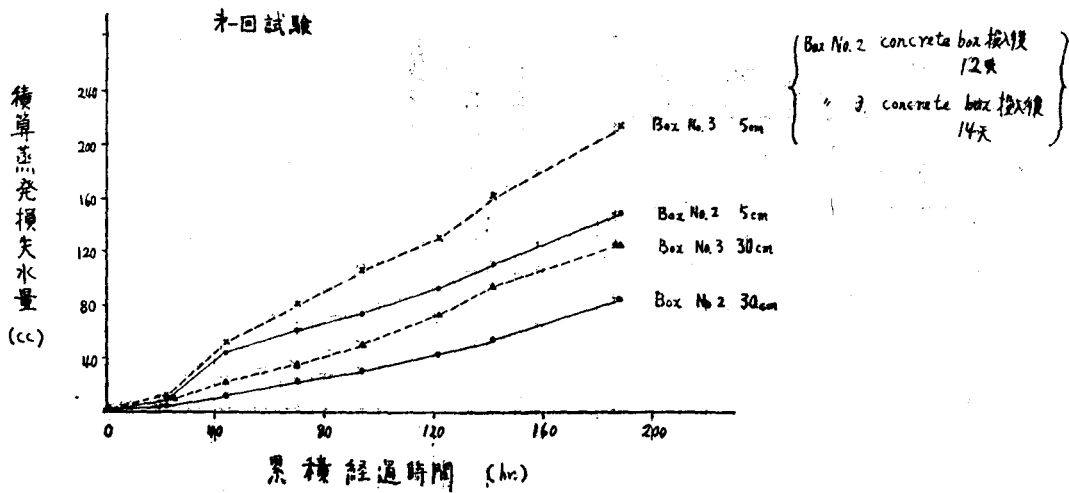


圖 6-5 使用 Mariott 管給水裝置之蒸發損失水量試驗  
 1972年4月2日~4月19日  
 於：臺大農工系園場，溫室內實驗

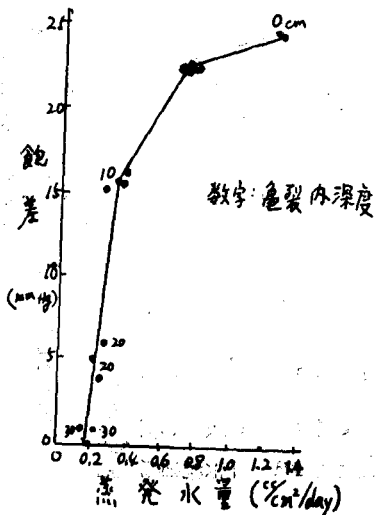


圖 6-6 龜裂內蒸發特性

box 後第20日 (box No. 2) 及第22日 (box No. 3) 由同年4月10日至4月19日。其結果如圖 (6-5) 所示，又將其飽差與龜裂壁面之蒸發水量之關係示於圖 (6-6)。

根據圖 (6-6) 所顯示，飽差與蒸發量之間成直線關係。龜裂內土壤壁面之蒸發特性，與懸掛濕土壤時所得之結果一樣，並與其位置之飽差有密切關係，同時由於深度方向飽差之誤差乃至蒸發受顯著之影響，而且在深度 30-35cm 處，雖然其飽差近乎零，但土壤上之蒸發仍在進行，此現象乃由於飽差之誤差而來之水蒸氣移動，顯示龜裂內深處之乾燥仍在進展。

關於龜裂內土壤之乾燥，特別，土柱龜裂內乾燥所引起之水分移動於前面已有敘述，直接的說，乃是根據其龜裂壁面之蒸發；間接的說，乃是土壤內之

水分往水量少的地方移動，其方向係朝向蒸發面。將已試驗過之各個 Concrete box (投入試料土壤後第46日 (No. 1)，第30日 (No. 2) 及第32日 (No. 3))

之土壤打開，調查土柱內部之含水量，及有關土柱斷面之水分分布以及水分之移動情況，如圖 (6-7) 及圖 (6-8)。

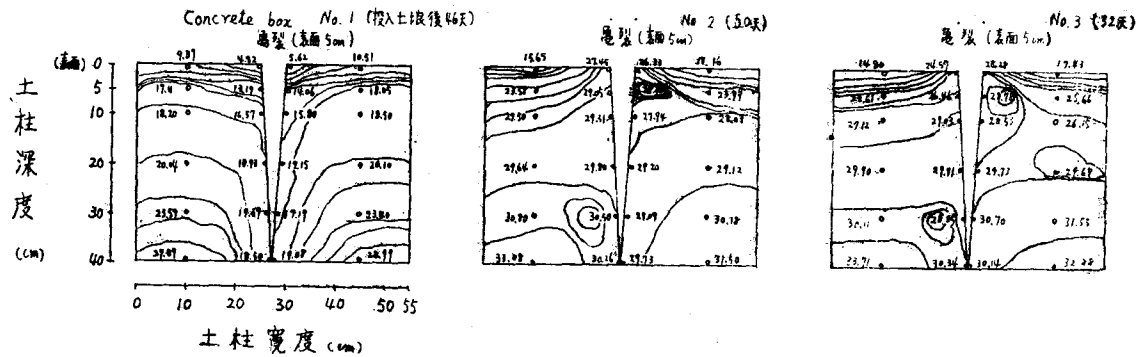


圖 6-7 土柱斷面水分分布並水分移動

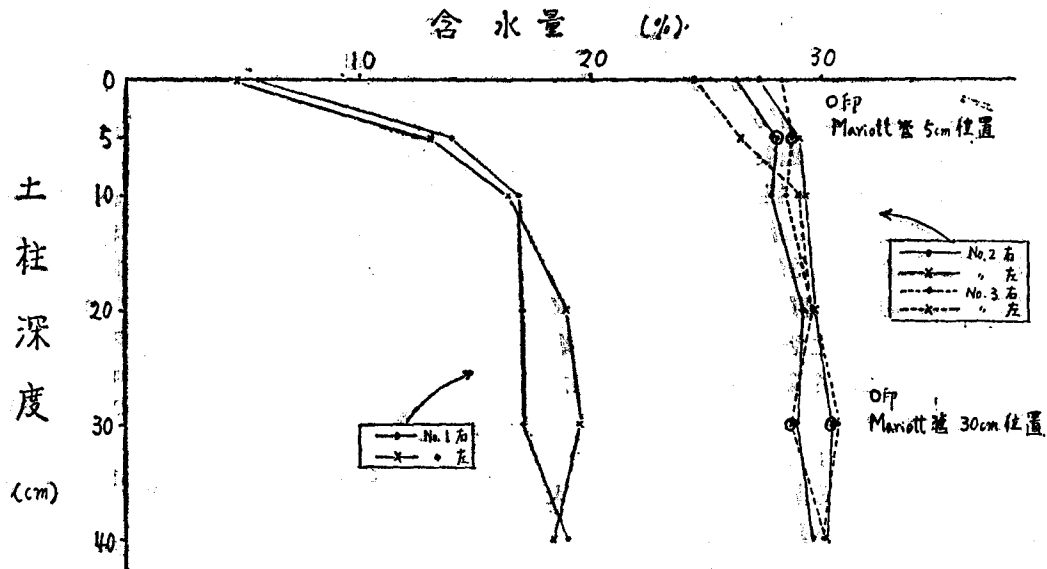


圖 6-8 土柱深度別含水量變化

No. 2 及 No. 3 由 Mariott 管供水，因此大致尚保持 30% 之含水量。No. 1 之情形，於表面下約 10cm 處，由於龜裂其含水量變化甚大。

故得悉，土壤水分因龜裂而引起之變化，乃向龜裂面移動。

### 伍、結論與建議

由上述之研究，可得結論如下：

一、使用模擬試驗之土壤乾燥特性為：

①土壤在 Concrete box 中之蒸發乾燥，僅進行於土壤之表面而已，其共可區別為三到四個階段。

即第一階段；大約到 PF 2.4 以內時，表示恒率乾燥，第二階段；PF 2.4 以後突然開始變減率乾燥，繼續到大約 PF 4 為止，第三階段；大約到 PF 4 以後，蒸發率變非常慢。

②因龜裂面之蒸發正在進行時，乾燥特別快，則前述乾燥曲線之上第一階段及第二階段立即消失不連續之區別。而只呈現第三、第四階段。

③當龜裂幅度達 1cm 以上時，土壤施行乾燥會發生顯著之影響。

④若覆蓋土壤龜裂面，而僅從土壤表面上使其蒸發乾燥時，則現恒率乾燥之階段，表層之水分狀態，

若達到 PF 值約 2.4 時，乾燥速度漸漸緩慢。此即由於粘質土壤乾燥收縮時，其土壤內部因素之變化，對土壤蒸發乾燥之影響。

⑥粘質土壤之乾燥特性有上層（深度15-20cm）與下層（比20cm更深處）之別。大到上則可區分為：①上層土壤之乾燥，水分約達到 PF2 時迅速乾燥，②以及其後慢慢進行乾燥之兩種。下層土壤乾燥，是當上層 PF 值達到 2 時才開始，此即為上層與下層土壤乾燥性質之不同特性。

二、關於土壤收縮舉動之特性，大致上可區別為：

①土壤之收縮舉動隨著脫水，而其體積會呈直線性地減少。達到某一階段以後，其土壤收縮程度會緩緩的下降，其至達到平衡狀態，到了此平衡階段，其土壤體積應恆為不變。

②當水分約達 PF4 時，實質上，收縮已告終止。

三、有關龜裂之性質

①經翻土後之水田，其粘質土壤本已接近均質狀態，於 PF1.6-1.7 土壤水分非常高之狀態下，還會發生龜裂，但這種龜裂並不會變大。當土壤水分為 PF1.8-2.0，則迅速發生新的龜裂，並伸長，擴大。

②龜裂之伸長非常迅速，經排水的第二天即迅速達到平衡。在研究粘質土壤之龜裂問題時，龜裂長度，可以當作常數來看，而以龜裂之寬度當縱軸，經過時間當橫軸，則有拋物線的關係。但龜裂開始時之長度與時間之比，要比龜裂之寬與時間之比大得多。龜裂的寬度即在深度與直線的關係而增大。於是龜裂之大小可由其寬代表之。

四、有關龜裂內部之蒸發；

①龜裂內壁土壤之水分蒸發現象，依深度之增大而顯著地減少，且與龜裂內壁之飽差成直線關係。

②環境條件相同時，其某一深度之飽差，則與龜裂內壁某一位置之寬度與深度之比，乃成拋物線的關係。

③由龜裂內壁飽差之差值，而知有水蒸氣之移動。水蒸氣蒸發現象係由土壤深處往表面移動，則進行深處部分的土壤乾燥。如上所述，水田粘質土壤之龜裂，對水田之乾燥有很大影響。

## 陸、參 考 文 獻

1. 坪井八十二他：農業氣象ハンドブック，養賢堂，1964
2. 佐藤武夫，奥田穰，高橋裕：災害論，勁草書房，1964

3. 三原義秋編：應用氣象學講座第三卷，農業氣象（上），地人書館，1961
4. 島山久尙編：氣象災害（防災科學技術シリーズ 1），共立出版，1966
5. 大後美保：農林防災（防災科學技術シリーズ 9），共立出版，1967
6. 日本粘土學會編：粘土ハンドブック，技報堂，1967
7. 狩野徳太郎：灌溉排水，養賢堂，1964
8. 後藤定年，小林潤：濕田粘質土壤のキ裂による水分損失について，農業土木研究別冊第一號，1960
9. 田淵俊男：粘土質の水田の排水に関する研究，農土論集第25號，1968
10. 佐藤晃一：重粘土の物理特性に関する研究，粘土の收縮舉動について(1)，農土論集第24號，1968
11. 土質試驗法解説編集委員會編：土質試驗法解説第一集改訂版，土質工學會，1962
12. Stephen P. Timoshenko, D. H. Young: Elements of Strength of Materials, 美亞書版，1972
13. Lambe, T.W.: Soil testing for engineers, M.I.T. 1962
14. Lambe, T. W.: The structure of compacted clay, Proc. A.S.C.E. 84, SM2. 1958
15. Seed, H. B. and C. K. Chan: Structure and strength characteristics of compacted clays, Proc. A.S.C.E. 85 SM5, 1959
16. Haggarty, G. J.: Measurement of shrinkage strains in soil. S. M. Thesis. M.I.T., 1957
17. Tempany, H. A.: The shrinkage of soils, J. Agr. Sci., 8 1917
18. Heines, W. B.: The volume-changes associated with variations of water content in soil, J. Agr. Sci., 13 1923
19. 中國農村復興聯合委員會水利工程組；國立臺灣大學農業工程學系：臺灣之水稻灌溉，民59年
20. 八幡敏雄他：土壤物理，養賢堂，1969
21. 石橋豐，林弘宣，太田更一，吉良芳夫，內藤利貞，田邊邦美，田中宏平：農業水利學，朝倉書店，1966
22. 山崎不二夫，長谷川新一：畑地かんがい，農山漁村文化協會，1959
23. L. D. BAVER: Soil Physics (Third Edition.), John Wiley & Sons. 1956
24. 陳振鐸譯 L. D. Baver 著：土壤物理學，教育部出版，民56年



25. 施嘉昌：Surface irrigation 講義，臺灣大學農工研究所，民59年
26. Roger J. M. De WIEST: GEOHYDROLOGY 新陸書局，1965
27. Orson W. Israelsen, Vaughn E. Hansen: IRRIGATION PRINCIPLES AND PRACTICES (Third Edition)
28. 工業計測技術大系編集委員會：濕度，水分測定，日刊工業新聞社，1965
29. 河上房義：土質力學，森北出版，1962
30. 山崎不二夫監修：土壤物理，養賢堂，1969
31. A. A. ロージエ著，山崎不二夫監譯：土壤と水
32. T. L. Lyon 等著，朱海帆譯：土壤學，教育部，民57年
33. 森田修二著：改著土壤學汎論，養賢堂，1965年
34. 川口桂三郎，熊田恭一，青峰重範，古坂澄石，佐々木清一，高井康雄，山根一郎，船引眞吾：土壤學，朝倉書店，1966
35. 徐玉標：灌溉土壤學講義，臺灣大學農工研究所，民59年
36. 徐玉標：土壤水(1)土壤之孔隙度，自然科學農業第18卷第五、六期，民59年
37. 徐玉標：土壤水(2)水之特性及水在土壤中之現象與本質，自然科學農業第18卷第七、八期，民59年
38. 徐玉標：土壤水(3)土壤水與植物之關係，自然科學農業第18卷第十一、十二期，民59年
39. 徐玉標：土壤水(4)土壤保持水分的位能觀念(1)(2)，自然科學農業第19卷第七、八期，民60年
40. 徐玉標：土壤水(5)土壤水分常數及土壤水形態之分類，自然科學農業第19卷第九、十期，民60年
41. 徐玉標：土壤水(6)自由重力水，自然科學農業第20卷第三、四~九、十期，民61年
42. 王明光，洪崑煌：臺灣土壤粘土礦物之研究(第二報)，中國農業化學會誌第九卷三、四期，民60年
43. Ralph E. Grim: Clay Mineralogy (Second Edition), 1962年
44. Dorothy Carroll: Clay Minerals: A Guide to Their X-ray Identification, 大學圖書出版社，1970
45. 杉二郎他名：鹽田地盤の物理的特性に關する研究，專賣公社中央研究報告No. 83, 1953
46. 後藤定年，小林潤：濕田土壤の龜裂の性狀と一防止法，農土研25(2), 1957
47. C. A. Black, D. D. Evans, L. E. Ensminger, J. L. White, F. E. Clark: Methods of Soil Analysis (Part 1), 美象出版社，1965
48. 陳振鐸，包德孟：水分保持量測定用自然狀態土柱之處理，國立臺灣大學農學院研究報告第五卷四期，民59年
49. 中國農業工程學會編：灌溉排水工程規劃手冊，臺灣省水利局叢刊之六十六，民56年
50. 農業土木學會編：農土木ハンドブック，丸善，1957
51. 農業土木學會：農業土木標準用語事典。

## 誌 謝

本文在農業工程研究所主任張建勛教授及研究所各師長之鼓勵與指導下，始克完成。其中承蒙美國 Missoari 大學土木系教授劉享立博士校閱並提供寶貴之意見與指正。指導老師徐玉標教授，平日悉心指導，於百忙中亦不時惠施教導，益我良多，深為銘感。專題討論時，施嘉昌教授，曹以松教授，易任教授並各位老師與研究所同學等曾提供寶貴意見與討論。農化系研究所教授陳振鐸博士，洪崑煌博士，及王明光先生亦曾給予觀念上之指示。試驗中，承蒙陳農場管理員與岩崎和明先生，農工系葉政秀講師，游福仁，陳益榮，湯松義，黃碧雲小姐熱心協助。知友楊瓊林，郭獻東兩位先生熱心協助翻譯，一併致謝。本研究係接授農業工程研究所之經費補助以辦理一切出差及實驗費用。謹此一併致上個人最大之謝意。