

農田灌溉方法之水理分析與研究(一)

臺灣大學農業工程系副教授

易 任

一、概 論

農田灌溉時，灌溉水量之損失如「蒸發損失」(evaporation loss)，可以耕耘(cultivation)方法使之減低；而「表面逕流損失」(surface waste)及「深層滲漏損失」(deep seepage loss)，則視作物類別、土質、地形、溝渠及農場佈置，灌水之方式，以及灌水時所用水頭之大小等因子而異。

本文在以土壤之吸水律(law of absorption)為依據，並試就數種灌溉方法之水理理論，針對上述各因子與「表面逕流」及「深層滲漏」兩種水分損失量之關係，在理論方面，作一有系統之研究分析；旨在指示此等因子應如何配置，始可將損失水量減至

最低限度，俾有助於農田灌溉之設計。

二、土壤水分與灌溉水量

(一) 毛細管水及毛管作用(capillary action)；

在未達飽和狀態之土壤中，存有部份水量與空氣；土壤內水分之存在，一為包被於土粒表面而成之附着水，二為游離充塞於土壤孔隙間之水分，孔隙內之水分不相接觸，且有間隙存在，其水面與空氣接觸處，為一彎月形(meniscus)之曲面，而與水面平行之方向，產生表面張力，由沿彎月面週邊表面張力之發出，促使毛細管水上升(圖1-a)。

土壤之孔隙連續排列而形成之微細管孔，自亦有毛細管之作用。如圖1-c，在臨近彎月面內側毛管應

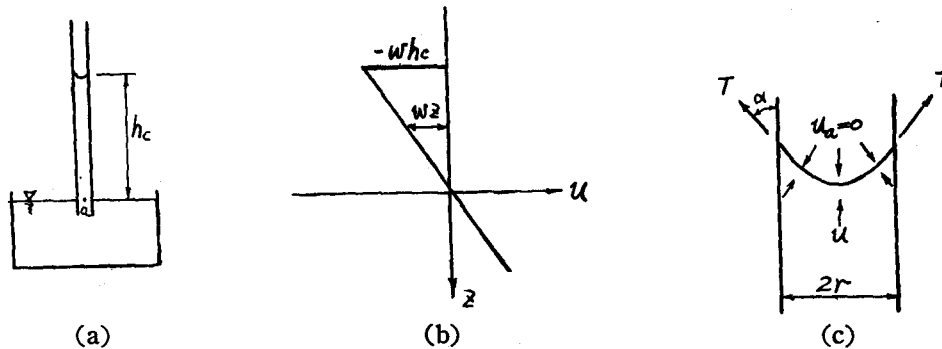


圖1 毛細管水頭高度與應力分佈圖

力(capillary stress) u ，在毛管水達於均衡狀態下，可以下式求得，設以表壓力為準，則大氣壓力 $u_a = 0$ 。

在平衡狀況下 $\Sigma F_r = 0$ ，即

$$T \cdot \cos \alpha \cdot 2\pi r + u \cdot \pi r^2 = 0$$

$$\text{亦即 } u = -2T \cos \alpha / r = -\frac{F}{A} \dots \dots \dots (1)$$

式中 α = 彎月曲面與毛管之接觸角亦即毛細角。

r = 毛管半徑。

A = 毛管斷面積 = πr^2

T = 某一溫度下水之表面張力。

F = 沿毛管水面周圍作用於管壁上之總表面張力 = $2\pi r \cdot T \cos \alpha$

當 α 小於 90° ，則 u 為負值，毛管水乃上升。

為計算毛管水上升之高度 h_c ，吾人可以彎月面下水所承受之應力 u 研究之。即

$$u = wh_c = 2T \cos \alpha / r = \text{大氣壓力} = 0$$

$$\therefore h_c = -2T \cos \alpha / wr \dots \dots \dots (2)$$

h_c 為負值，表示水位高出水面；毛管中水位上升部份承受之張力為圖1-b所示。並可知毛管水中之靜水壓力之變化為自最小值 $-wh_c$ 漸增至零而止(圖1-b)。

設彎月面之半徑 $r_m = r$ ，則 $r = r_m \cos \alpha$ ，即

$$u = -2T \cos \alpha / r_m = \cos \alpha = 2T / r_m \dots \dots \dots (3)$$

由(3)式可知 u 與 r_m 成反比，意即 r_m 最小

時毛管應力最大，同時彎月面須與管壁相切，亦即 $\alpha=0$ ，故圓形之毛細管，其 r_m 恰與毛管半徑 r 相等，例如圓形玻璃毛細管與水之毛細角 $\alpha=0$ ，表面張力 $T = -0.075$ 公克/公分，亦即 -0.005 磅/英尺。

由式 (1) 得：
$$F = A^2 T \cos \alpha / r$$

$$= \pi r^2 T \cos \alpha / r$$

$$= 2\pi r T \cos \alpha \dots \dots \dots (4)$$

又因 F 亦等於上升水柱之重量，故

$$F = wAh_c \dots \dots \dots (5)$$

今設想將一土柱置於液面，亦必因毛細管之作用，水分自土壤之孔隙內上升，達 h_c 之高度而止。圖 2 中之土柱頂面，設為無數之彎月面所組成，而此面

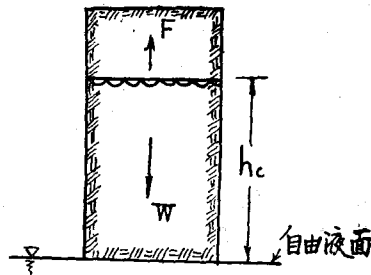


圖 2 土柱內毛管水上升示意圖

上之毛管力 F ，亦應等於該土柱內上升水分之總重量 W (圖 2)。

$$\text{即 } F = wAh_c \cdot P_s \cdot \eta \dots \dots \dots (6)$$

式中 P_s = 土壤之飽和百分率 (percentage of saturation)

η = 孔隙率 (Porosity)

由上式 (6) 可知每單位面之彎月面所產生之毛管力應為：

$$u = \frac{F}{A} = wh_c \cdot P_s \cdot \eta \dots \dots \dots (7)$$

(二) 土壤之滲流係數 (permeability coefficient) K 與滲流阻力 F_f ：

(1) Poisenille 氏定律：

細小管內之水流速度甚為緩慢者，均屬滯性流 (viscous flow) 或線流。如圖 (3) 表示線流中 dy 寬度內之情形，臨近管壁處因阻力之影響大，故流速較中心及臨近中心者緩慢，於 dy 距離內，其速度相差為 dv 。

上下兩面單位面積上之切應力 τ ，因與 dv/dy 及水之粘滯率 μ 成正比，故

$$\tau = u \frac{dv}{dy} \dots \dots \dots (8)$$

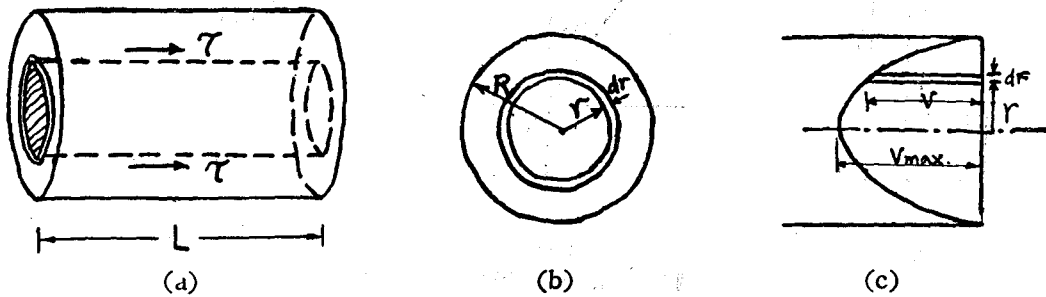


圖 4 細管內水流及水流速度分佈之情形

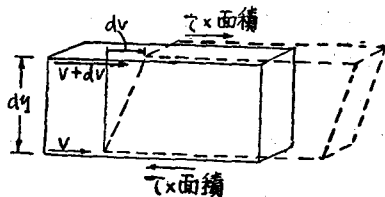


圖 3 水流速度與切應力

於圖 (4) 中設 R = 細管之半徑
 L = 水流經述之距離
 h_L = 水頭損失
 r = 細管內任何同心圓柱之半徑

細管兩端之壓力差為 wh_L ，而總壓力差應為 $\pi r^2 wh_L$ ，此壓力應與總切應力相等。總切應力為

$$2\pi r L \mu \left(-\frac{dv}{dr} \right),$$

$$\text{因 } \pi r^2 wh_L - 2\pi r L \mu \left(-\frac{dv}{dr} \right) = 0$$

$$\text{則 } dv = -\frac{wh_L}{2\mu L} r dr$$

$$\text{積分之： } v = -\frac{wh_L}{4\mu L} r^2 + C$$

因係線流，當 $r=R$ 時， $v=0$

$$\text{故 } C = \frac{wh_L}{4\mu L} R^2$$

故得 $v = wi (R^2 - r^2) / 4\mu \dots\dots\dots(9)$

式中 $i = h/L$ 為水力坡度 (hydraulic gradient)

由式 (9) 可求得任何一點之流速。

又因滲流量 $Q = \int_0^R v 2\pi r dr$ [圖 (4)]

將式 (9) 中之 v 代入，並積分之，得

$Q = \pi R^4 wi / 8\mu \dots\dots\dots(10)$

亦故 $Q = \frac{wR^2}{8\mu} iA \dots\dots\dots(11)$

即全斷面平均流速 $V_a = \frac{wR^2}{8\mu} i \dots\dots\dots(12)$

式 (12) 即為有名之 Poisenille 氏定律。

(2) Darcy 氏定律：

土壤中孔隙與孔隙之間雖係相互連通，但由於孔隙之斷面不規則，因之形成之毛管管徑亦不一致，故式 (12) 等，不可應用計算土壤之透水性。但由式

(12) 可知 V_a 與 i 成比例，即 $V_a \propto i$

即 $V_a = Ki \dots\dots\dots(13)$

式中 K 為比例常數與土壤孔隙之大小與形狀有關，並特名之為滲流係數，亦即有名之 Darcy 氏定律也。 K 值需由試驗求得之。

如欲計算土壤中之滲流量 Q ，則

$Q = V_a A = KiA \dots\dots\dots(14)$

式中斷面積 A 乃與土粒斷面積 A_s 與孔隙斷面積 A_v 之總和。流量 Q 與土壤斷面積 A 之比稱為表面流速 (superficial velocity) v ，水流於土壤孔隙內之流速則稱為滲流速度 (seepage velocity) V_s ，得

$Q = AV = A_v V_s$

因 $A_v = \eta A$

故 $V = \eta V_s$

通常 A_v 不易求得，故多以 A 計算之。

圖 (5) 為證明 Darcy 定律之圖示。

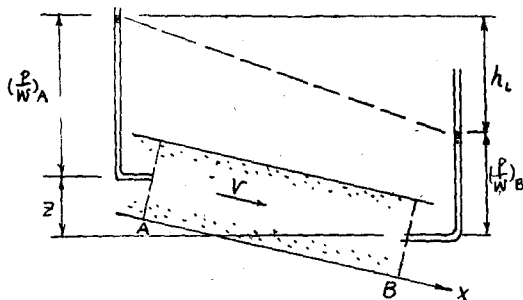


圖 5 土壤中水之滲流測定裝置，由此可證明 Darcy 定律

(三) 土壤因數對於土壤吸水率之影響：

乾燥之土壤在降雨或灌溉時，即由毛管力及重力之聯合作用，吸水下滲，其吸水律可以圖 (6) 及下述法則以明之。

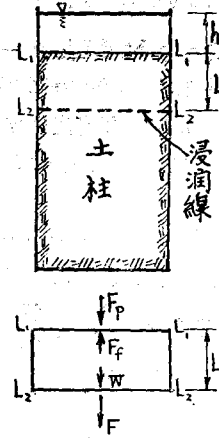


圖 6 土壤吸水律及土壤因數測定裝置

如在一定大小之土柱表面灌水，並使水面始終保持一定之高度 h_0 ，當土壤與水接觸後，即開始吸水，設經 t 時間後， L 段之土壤已濕潤，則 t 與 L 之關係可由下述之方法求得之。

取 L 段之土柱為自由體 (take as a free body)，則此自由體上所受各力，分別為：

- (1) L_2-L_2 面上之毛管力 F
- (2) 水在土柱間流動時之摩阻力 F_f
- (3) L_1-L_1 面上水頭 h_0 之壓力 F_p
- (4) 水流本身之重量 W ，

由式 (7) 知 (1) 項之毛管力為

$F = wAh_0P_s\eta \dots\dots\dots(15-a)$

(3) 項 h_0 水頭之壓力 $F_p = wh_0A \dots\dots(15-b)$

(4) 項水流本身之重量

$W = wALP_s\eta \dots\dots\dots(15-c)$

至於 (2) 項水在土柱間流動時之摩阻力 F_f ，可以前節所述之 Darcy 定律求之。

由式 (13) $V_a = Ki$

當水流在明渠或飽和土壤中緩流時，如水力坡度為 i ，則每一單位體積土體中之水分所受之阻力 F_f 為 wi ，此項理論亦適用於毛管水之流動，則單位土體中水分所受之阻力亦應為 $f_f = wi = w \frac{V_a}{K}$ 即

L 段土體中水分流動所受之阻力應為

$F_f = \frac{w}{K} V_a AL = \frac{w}{K} AL \left(\frac{dL}{dt} \right) \dots\dots\dots(15-d)$

根據牛頓定律，此四力之代數和，應等於水流之質量 $M (=wALP_s \cdot \eta/g)$ 與水流加速度 d^2L/dt^2 之乘積，即

$$M \frac{d^2L}{dt^2} = F + F_P + W - F_r \dots\dots\dots(16)$$

式 (16) 中慣性力 $M d^2L/dt^2$ 一項，除在水流開始流動之極短暫時間外，餘均較其它各力為小，故可略視之。又如 h_0 之水頭高度保持較小，使不超過 2 公分，則 F_P 之值亦可略去，即 (16) 式可改寫為：

$$F + W = F_r \dots\dots\dots(17)$$

以式 (15) 各值代入式 (17)，得：

$$h P_s \eta + L P_s \eta = \frac{L}{K} \left(\frac{dL}{dt} \right)$$

化簡並令， $P_s \eta K = K_0$ ，則

$$h_0 = \frac{L}{K_0} \cdot \frac{dL}{dt} - L \dots\dots\dots(18)$$

式 (18) 為理論推演之結果，蓋以土壤開始與水接觸時，水之下滲率極大，Darcy 定律不能適用，故應再假定一最初滲入深度 (initial penetration) L_i ，以補救此理論上之缺點。 L_i ， K_0 及 h_0 即為影響土壤吸水性能之主要土壤因數，其值隨土壤之顆粒大小級配，孔隙率以及溫度等因子而異，利用圖 (6) 之裝置，可求得某種土壤之滲流深度 L 與時

間 t 之關係曲線，間接求得 L_i ， K_0 及 h_0 之或然值 (probable value)，故須配合試驗，求得試驗公式，俾得滿意之結果。

(四) 表土儲蓄水量：

農作物之根鬚通常所及之深度，不過二公尺上下，作物成長時，即由此二公尺深之表土內吸取水分，當表土水分減至凋萎係數前，即應灌溉，以免影響作物之生長。

如土壤儲水量 (soil capacity or field capacity) 與灌水前土壤含水量之差，乘以表土深度而得之水分總量為表土蓄水量，則此項水分即為灌水後，能藉毛管作用而保留在表土內之最大水分量，藉供作物之吸收。土壤吸入之水量如超過此數，則超過部份即將滲入土壤深層，而成滲漏損失矣！各類土壤之表土儲蓄水量，均須藉助試驗，分別求得之。

(五) 灌溉水量：

灌溉所用水量，多以水深計之，故稱灌溉水深，此項水量一部份吸入土壤中，一部份則流經地面洩入農田下游端之排水溝中，是謂表面損失；吸入土壤之水量如超過表土蓄水量，則超過部份即為深層滲漏損失。又灌水時所用流量之大小，一為灌水速度大小之控制，一為水量大小之控制。其目的均在設法減少上述兩項水量之損失。 (未完待續)

中國農業工程學會司選委員會簡章

- 一、中國農業工程學會 (以下簡稱本會) 為辦理理監事選舉事宜，須於年會或會員大會前三個月，設立司選委員會 (以下簡稱本委員會)。
- 二、本委員會之任務為辦理下年度三分之一理事及三分之一監事改選事宜。
- 三、本委員會設委員七人，以常務監事及總幹事為當然委員，以總幹事為召集人其餘委員五人由理監事聯席會議就本會正會員中提名倍數，以通信方式由全體會員選定之 (會員選舉時不以本理監事聯席會議提出之候選為限而得另選其他正會員)。
- 四、本委員會應於成立後半個月內提出應改選理事及監事人數三倍之候選人名單，製定選票，用通訊方式舉行全體會員普選。
- 五、本委員會寄發選票時，應將投票截止日期通知各會員，逾期不寄選之選票認為棄權。
- 六、本會會員選舉時不以本委員會議提出之候選人為限，而得另選其他正會員，本委員會所製發選票上留有空白位置 (與應改選理監事人數相等) 以備會員填寫其不寫在規定位置者選票作為無效。
- 七、本委員會於投票截止日期後一週內開票，並將開票結果詳細統計連同選票彙送本會理監事會，並將當選理監事及候補理監事名單於年會或會員大會時通告全體會員。
- 八、本委員會得向年會或會員大會提出報告，並經年會或會員大會接受後即行結束。
- 九、本簡章經本會會員大會通過後施行，修正時亦同。