

滴水灌溉之水力性質及其均一性

Hydraulics and Uniformity for Drip Irrigation*

I-pai Wu and Harris M. Gitlin 原著

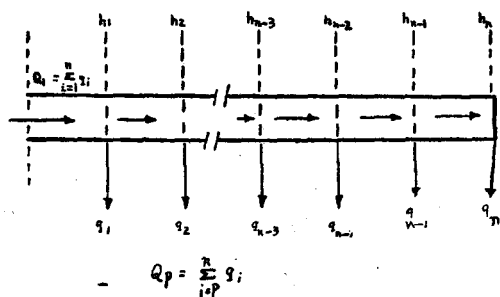
徐文翰**

蔡明華*** 譯

一、前 前

滴水灌溉系統可當如管路系統考慮，它包括主管、副管、支管和衆多的出水口。其設計為將水直接導至植物根系。它通常在低壓情況下操作，如小於 15psi (100kn/m²)。其沿支管或副管之壓力分佈受管之摩擦及坡度所影響。理想的灌溉系統乃是能以均勻灌溉者，即每一出口之出水流量，等於每次灌溉之作物所需水量。

在滴水灌溉管線之水流條件，可以考慮為穩定流，隨着支管流出量而漸漸變化 (Spatially varied with lateral outflows)。沿着滴水灌溉線，支管或副管之流量分佈示如圖一，是視管線長度而漸減。圖一表示一條管線上有 n 個等長之段，從每一段之出水流量為 q_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)，因此，每一段之水流可以下式表示。



圖一 沿滴水灌溉線之流量分佈與壓力

$$Q_p = \sum_{i=1}^n q_i \dots \dots \dots (1)$$

式中 Q_p = 在第 p 節之流量
從首端供應之全部流量為

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n q_i \dots \dots \dots (2)$$

當流量在管線上發生變異，其能量坡降線將不是一條直線，而是一條指數型之曲線。沿管線上之壓力

分佈僅能由確知管線之能量坡降而求得。關於前述這類型流體條件研究，Garton, Beasley, and Barefoot, Sweeten and Garton 等在自動畦溝灌溉效用，Vant woudt 在多孔管之均勻流量等文中，已有所闡述。在 1972 年，Myers and Bucks 利用多出水口型系統為達均一出水口流量提出一圖解法，且 Kenworthy 為從每一出水口獲得均一流量，也提出修正短管出水口之長度。他們之研究結果已經顯示，如沿着管線之壓力分佈可以測定時，均勻的流量可以獲得。

本文將討論包括一沿着滴水管線壓力分佈之簡便估算方法，同時，為了獲得如意地均一出水口流量，提出數個方法以調整或安排出水口。

二、滴水灌溉管線之能量關係

在明渠方面流量漸減漸變流之動態方程式可以簡化為：

$$\frac{dh}{dL} = S_o - S_f \dots \dots \dots (3)$$

式中： S_o = 滴水管線之坡度。

S_f = 摩擦坡度。

$\frac{dh}{dL}$ = 壓力對長度方面之變率或為壓力坡降線坡度。

方程式 (3) 表示壓力分佈可以能量坡度 S_f 及滴水管線坡度 S_o 之線性合併求得。為求推演之表示簡便，假如 S_o 為 0 時，即把管線放在水平的狀態下。則

$$\frac{dh}{dL} = -S_f \dots \dots \dots (4)$$

假使滴水管線是平滑之管時，即可以 Blasius 之經驗公式求得摩擦係數。

$$f = \frac{0.3164}{R^{0.25}} \text{ for } 3,000 < R \leq 100,000 \dots \dots (5)$$

取方程式 (4) 及 (5) 化簡之

* 原文載 Proceedings of ASCE, Vol 99, No. IR2 June 1973

** 徐文翰：水利局崎頂海岸砂丘地灌溉實驗站農業技師

*** 蔡明華：水利局崎頂海岸砂丘地灌溉實驗站主任

$$\frac{dh}{dL} = -KQ^{1.75}$$

$$\text{式中: } K = \frac{2.53v^{0.25}A^{0.25}}{g\pi^{0.25}D^{5.25}} = \text{常數} \quad \left. \vphantom{\frac{dh}{dL}} \right\} \dots\dots (6)$$

方程式 (6) 能測定長度 dL 間之能量坡降。假如 dL 是固定在已短長度範圍, ΔL 且當作常數考慮, 則方程式 (6) 能以數解。

$$\Delta h_p = -KQ_p^{1.75}\Delta L \dots\dots\dots (7)$$

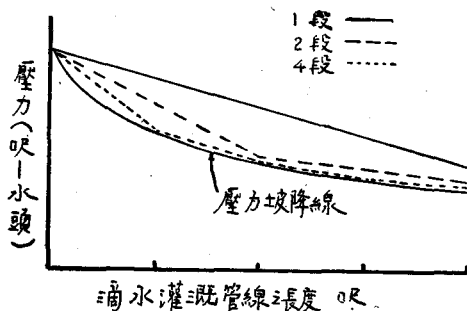
式中: Δh_p = 第 p 段之摩擦損失。

總摩擦損失 ΔH

$$\begin{aligned} \Delta H &= \sum_{p=1}^n \Delta h_p \\ &= -K \left(\sum_{p=1}^n Q_p^{1.75} \right) \Delta L \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\Delta H} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

三、沿滴水管線壓力分佈之測定

方程式 (6) 能證明此一壓力坡降線不是直線。因在上游段流量較大, 將有更多的摩擦損失。壓力坡降線乃為一指數型之曲線, 示如圖二。



圖二 利用全部各段與用 1, 2 或 4 段之平均流量所計算之壓力坡降線

此壓力坡降能以方程式 (7) 推算出來, 不論如何, 在出口處將會遭遇數百次乏味的推算, 但如使用平均流量計算將可簡化。壓力坡降線之變異計算, 可用全部 n 段及使用簡單之平均流量, 或數段之平均流量求出, 示如圖二。

假定每一個出水口流量全部相等, 即可作一電腦程式, 如在第 1 段之全部流量為 nq , 而最後段之流量為 q 。沿管線一段之能量損失, 可以下式表出:

$$\Delta h_p = -K[(n-p+1)q]^{1.75}\Delta L \dots\dots\dots (9)$$

總能量損失為:

$$\begin{aligned} \Delta H &= -Kq^{1.75}[n^{1.75} + (n-1)^{1.75} + \dots + 2^{1.75} \\ &\quad + 1^{1.75}]\Delta L \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

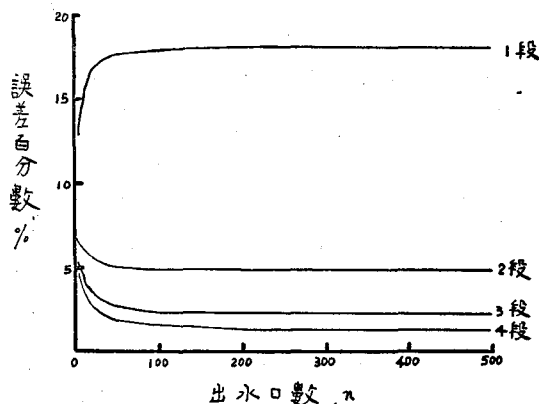
當使用平均流量時之能量損失為:

$$\Delta H_1 = -Kq^{1.75} \left[\frac{n+1}{2} \right]^{1.75} L \dots\dots\dots (11)$$

對 n 值從 1 作至 1,000 之計算結果, 很有趣地可從計算中發現, 僅用平均流量來計算, 隨 n 值而減少之能量損失誤差之百分比在超出 $n=100$ 後, 其誤差百分比僅為 18% 左右, 示如圖三。(圖三所繪出之 n 值是從 1 至 500)。

相差 18% 尚不能當作是嚴重的誤差。但是, 在沿着管線的大多數段之壓力變化是大於 18%, 特別是中央段, 正如圖二所示。

這個誤差能利用將管線全長分成幾個部分, 及使用每一段之平均流量來計算能量損失以減少。如此作, 誤差可大大地減少, 圖二及圖三顯示, 使用 2, 3, 4 段之誤差計算結果, 由此可顯示, 如使用二段計算, 則其誤差可減低至 5%, 如用 3 或 4 段計算, 則其誤差可減低至 2% 或 1%, 示如圖二及圖三。由是能得到結論, 若將全長分成 3 或 4 段來計算能量坡降線將能產生良好的坡降線估算。



圖三 利用全部以一段之平均流量與用分成二至四段之平均流量以計算壓力坡降線所造成之誤差比較。

四、在壓力水頭變異下之均勻流量

沿滴水管線之壓力變異, 不管是支管或副管均可由假設沿着每一線路之流量均勻來決定。因此, 必須探討方法以得到相等的流量 (q), 以對應於管線上之不同壓力。可以調整滴水口之大小, 滴水短管之短管長度, 滴水口之間距, 以求均勻之流量, 其分析如下述:

1. 滴水口直徑之測定——每一個滴水口之流量, 由滴水口大小及在滴水口之壓力水頭所支配, 此可由簡單的連續方程式來推演:

$$\left. \begin{aligned} q &= av \\ q &= aC\sqrt{2gh} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

或 $q = \frac{C\pi}{4} \sqrt{2g} d^3 h^{1/2} \dots\dots\dots (13)$

式中： q = 滴嘴截面積， c = 流量係數，方程式 (13) 可重新排列為：

$$\frac{4q}{C\pi\sqrt{2g}} = d^3 h^{1/2} \dots\dots\dots (14)$$

假如 q 是常數，則 $d^3 h^{1/2}$ 之微分為零：

$$\frac{1}{2} d^3 h^{-1/2} dh + 3d^2 h^{1/2} dd = 0 \dots\dots (15)$$

再重新排列：

$$\frac{dh}{h} = -4 \frac{dd}{d} \dots\dots\dots (16)$$

積分之：

$$\ln h = -4 \ln d + C \dots\dots\dots (17)$$

假如 h 及 d 之關係是已知數，並將它當作最初條件，則

$$\left. \begin{aligned} d &= d_0 \\ h &= h_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

積分常數 C ，則求出為：

$$C = \ln h_0 + 4 \ln d_0 \dots\dots\dots (19)$$

把 C 代入方程式 (17) 化簡之：

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \dots\dots\dots (20)$$

因此假定一組 h_0, d_0 是已知，滴水口之直徑 d 能由任何 h 來決定。 h_0, d_0 是實際支配均勻流量 q 之設計。

2. 滴水短管長度之決定——短管流量能由短管之長度來調整，此種關係可由圖四及能量方程式來表示。

$$h = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = f \frac{l}{d} \frac{q^2}{a^2 2g} \dots\dots\dots (21)$$

假如短管之直徑已決定，則 q, a 及 f 全為常數。

$$\left. \begin{aligned} h &= C_1 l \\ \text{式中：} C_1 &= \frac{f q^2}{2g d a^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

此意為假定最初條件 h_0, l_0 為已知，則可求得其流量。

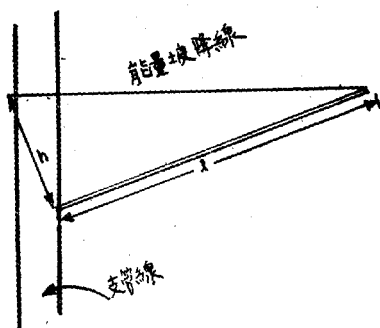
$$h_0 = C_1 l_0 \dots\dots\dots (23)$$

比較方程式 (22) 及 (23)，對已知壓力之短管長度，可以測定：

$$\frac{h}{h_0} = \frac{l}{l_0} \dots\dots\dots (24)$$

或 $l = \frac{h}{h_0} l_0 \dots\dots\dots (25)$

假如沿着支管線之壓力變化很大時，則短管之長度也許過長，那麼可以應用較小之短管。流速、直徑、壓力之資料已由 Kenworthy 蒐集並發表。



圖四 連結支管線上之滴水短管之能量坡降線

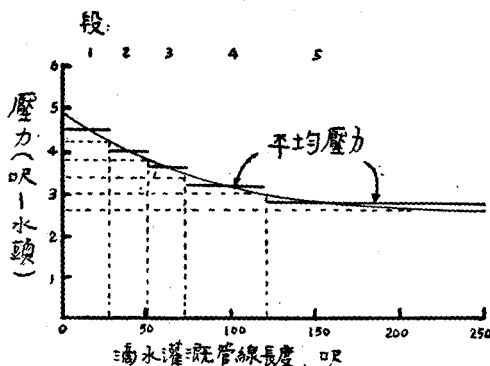
3. 滴水口間距之決定——假如滴水口間距可以調整時，則滴水口間距可以設計，因每一單位長度之流量是常數，這可由下列數學式示之：

$$\frac{q}{\Delta L} = \frac{q_1}{\Delta L_1} = \frac{q_2}{\Delta L_2} = \dots = \frac{q_n}{\Delta L_n} \dots\dots\dots (26)$$

假使壓力坡降線是由每一出水口之固定流量 q 及出水口之固定間距 ΔL ，示如圖五來估算。壓力坡降線根據落差及對每一段之平均壓力可計算示如圖五之重線而區分成數段。假如滴水頭已被選定，則對五個部分 ($j=5$) 之滴水頭流量 $q_1, q_2, \dots, q_5$ ，可以由得知 $h_1, h_2, \dots, h_5$ 求得。每一段之出水口間距可由式 (26) 求得。

$$\Delta L_j = \left(\frac{q_j}{q} \right) \Delta L (j=1, 2, \dots, 5) \dots\dots\dots (27)$$

因為每一單位長度之流量 (從滴水頭) 是固定的，在給水線 (支線) 每一段前端之總流量均為固定，對原始條件 q 和 ΔL 之每一段之平均流量均相等，因此壓力坡降線將不可能變化。



圖五 沿滴灌管線之壓力坡降線及對數段之平均壓力

五、工程應用

前節所述，假如對滴水灌溉管線 ($q, \Delta L$) 之壓力坡降線，可以估計的話，則均一之流量可以由下列方法獲得：(1) 滴嘴之不同直徑。(2) 短管之不同長度或短管之長度與直徑組合。(3) 不同之滴水頭間距。選擇一設計實例以說明所發展技術之應用，這實例為由 Myers 及 Bucks (5) 所舉出。用此表示一 205 呎 (76 公尺) 長，0.75 吋 (19 厘米) 之塑膠管，其滴水頭間距為 2 呎 (0.6 公尺)，流量 1.5 每小時加侖 (5.7 升/小時)；沿着管線之壓力分佈示如圖五。均勻灌溉之設計，示如下述：

1. 滴水頭直徑之設計——已知資料： $L=250$ 呎 (76 公尺) $q=1.5$ 每小時加侖 (5.7 升/小時) 及 $\Delta L=2$ 呎 (0.6 公尺)。最初條件： $h_0=4.5$ 呎 (1.4 公尺) 及 $d_0=0.029$ 吋，內徑 (0.74 厘米)。

根據所給之滴水壓力損失，壓力分佈線可分為數段，每一段之平均之壓力可以測定，假如在第 1 段壓力及滴水頭流量，當作最初之條件： $h_1=h_0=4.5$ 呎 (1.4 公尺) 及 $d_1=d_0=0.029$ 吋 (0.74 厘米)。

第 2 段之滴水頭直徑為， $d_2=(h_0/h)^{0.25}$ ， $d_0=(4.5/4)^{0.25} \times 0.029=0.029$ 吋 (0.76 厘米)。

在其他段之直徑，可以由 (20) 式計算求得： $d_3=0.0308$ 吋 (0.78 厘米)， $d_4=0.0316$ 吋 (0.80 厘米) 及 $d_5=0.0326$ 吋 (0.83 厘米)。由 Myers 及 Bucks (5) 所給之圖解結果為： $d_1=0.029$ 吋 (0.74 厘米)， $d_2=0.030$ 吋 (0.76 厘米)， $d_3=0.031$ 吋 (0.78 厘米)， $d_4=0.032$ 吋 (0.81 厘米)， $d_5=0.033$ 吋 (0.84 厘米)，此結果與計算者甚為接近。

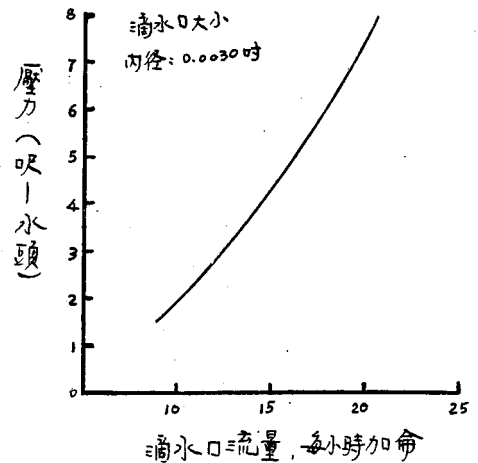
2. 短管長度之設計——已知資料： $L=250$ 呎 (76 公尺)， $q=1.5$ 每小時加侖 (5.7 升/小時) 及 $\Delta L=2$ 呎 (0.6 公尺)。

最初條件 (4)： $h_0=4.5$ 呎 (1.4 公尺) 及 $l_0=2.8$ 吋 (71 厘米)，根據在圖五所表示各段之平均壓力，每一段之短管亦可由 (25) 式來決定，第 1 段之最初條件： $h_1=h_0=4.5$ 呎 (1.4 公尺) 及 $l_1=l_0=2.8$ 吋 (71 厘米)，第 2 段之短管長度： $l_2=4/4.5 \times 2.8=2.5$ 吋 (64 厘米)，第 3、4、5 各段之短管長度亦可由計算得知為： $l_3=2.2$ 吋 (56 厘米)， $l_4=2.0$ 吋 (51 厘米)， $l_5=1.75$ 吋 (45 厘米)。

3. 滴水頭間距之設計——已知資料： $L=250$ 呎 (76 公尺)， $q=1.5$ 每小時加侖 (5.7 升/小時) 及 $\Delta L=2$ 呎 (0.6 公尺)，假使選定第二號滴水頭 (內

徑：0.030 吋)，如同 Myers 與 Bucks 所舉者時，流量——水壓之關係示如圖六。每一段之滴水頭間距可由 (27) 式計算求得第 1 段之滴水頭間距可計算如下： $\Delta L=24$ 吋 (610 厘米)， $q=1.5$ 每小時加侖 (5.7 升/小時)， $h_1=4.5$ 呎 (1.4 公尺)， $q_1=1.51$ 每小時加侖 (5.7 升/小時) (從圖六)；及 $\Delta L_1=(1.56/1.5) \times 24=25$ 吋 (640 厘米)。

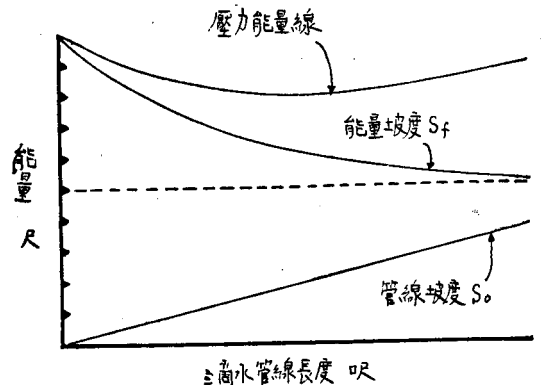
第 2 段之滴水頭間距可由計算得到： $h_2=4$ 呎 (1.2 公尺)， $q_2=1.45$ 每小時加侖 (5.7 升/小時) 及 $\Delta L_2=(1.45/1.5) \times 24=23$ 吋 (580 厘米)，第 3，4，5 各段之滴水頭間距亦可同上述之計算得知為： $\Delta L_3=22$ 吋 (560 厘米)， $\Delta L_4=21$ 吋 (530 厘米)， $\Delta L_5=19$ 吋 (480 厘米)。



圖六 第二號滴水頭之流量——水壓關係

六、滴水灌溉線置於斜坡上

沿着滴水灌溉線之壓力分佈，不管是在上坡或下坡，均可由 (3) 式來決定。壓力坡降 (dh/dl) 是由



圖七 沿滴水灌溉線之能量坡度，管線坡度與坡降線。

能量坡度 S_r 及管線坡度 S_o 之線性組合而成。因此沿着滴水灌溉線之壓力分佈，可以由簡單的重疊累加管線坡度 S_o 及決定於水平情況之能量坡降。其組合如圖七所示。

此應注意，假如管線情況是下坡則 S_o 應給予正符號，反之則給予負符號。如沿管線有一壓力分佈可決定（示如圖七），則調整三項之任何一項均可以使沿着滴水灌溉管線獲得均勻滴水流量。

七、摘要與結論

本研究已表示沿着支管之壓力分佈可以管線坡度及由 3 或 4 段之平均流量所計算之能量坡降來估算。與以用全部滴水頭間各段所計算之壓力坡降線之計算比較，其誤差可小至 2%。此一計算乃是根據全部滴水頭之均一水流及固定之滴水頭間距。

假如沿支管線之每一滴水頭水流固定，其壓力分

佈已被測定，則可以用不同大小之滴水頭，不同長度或不同大小之短管及滴水頭間距等來求得均勻之灌溉。

本研究主要是討論關於沿着支管線上之均勻灌溉。相同技術可以用於計算沿着副管之壓力分佈。不論如何，副管本身亦可以自行調整；能用不同之直徑以保持沿着副管線相當均勻壓力或利用自然坡度之利益。

利用 Blasius 方程式決定摩擦係數，將會產生某些誤差，其原因為：(1) 線流條件發生在某些下坡段。(2) 某些型式的滴水頭插入管裏，將產生更大的摩擦。為減低這型誤差，於實驗室對決定摩擦係數與不同滴水灌溉線型式之水流條件關係進行試驗是必須的。

本研究提出滴水灌溉系統基本之能量關係及數種可獲致更均勻滴水灌溉系統之方法。

圖書消息

本會承機關團體及會員陸續捐贈書刊，茲將贈書者大名刊登，以表謝意。

捐 贈 者	書 名	冊 數
經濟部水資源統一規劃委員會	水資源經濟研究計劃報告（民國58年至61年）61年12月出版	1
經 濟 部、中 央 標 準 局	標準 第二五一、二五二、二五三、二五四、二五五、二五六、二五七期	7
經 濟 部 中 央 標 準 局	商標公報 第一卷第一、二、三期	3
經 濟 部 中 央 標 準 局	專利公報 第一卷第一、二、三期	3
金 屬 工 業 發 展 中 心	金工 第七卷第五期、第八卷第一期、63年一月	2
水 利 協 進 會	臺灣水利 第二十一卷第四期	1
中 國 工 程 師 學 會	工 程 第四七卷 第一、二期， 63年 1、2月	2
Finish Journal of Water Economy. Hydraulic and Agricultural Engineering--Finland.	VETISALOUS No.3, No. 5, 1973	2
International Institute for Land Reclamation and Improvenemt- Wageningen/The Neterlands	Annual Report 1972	1