

噴氣式深耕機作業時土壤內 壓力分佈之理論研究

The Study of Pressure Distribution in Soil by a Pneumatic Cultivator

國立中興大學農業機械工程學系副教授

彭 錦 樵

Jin-chyau Peng

摘 要

利用噴氣式深耕機將壓縮空氣噴入土壤中，以實施深層中耕，改善土壤結構，提高作物產量，已被證實為可行的方法。然而，有關壓縮空氣在土壤中噴出時，它之流動現象及土壤承受之壓力變化情形，尚未有完整之理論基礎。本研究設計一土槽之實驗裝置系統，模擬實際之田間土壤狀況，進一步探討壓縮空氣在土槽中噴出時，距離噴口不同半徑與深度下，土壤所承受之壓力分佈情形，以提供更具體之資料，作為改善中耕作業之理論依據。

實驗結果顯示：

1. 深耕機本體之空氣壓力為 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ (980kpa) 時，其壓縮空氣在土壤中噴出時噴口之空氣壓力為 $9.19\text{kg}/\text{cm}^2$ (900kpa)。

2. 噴口在地表下 25cm 時，可應用

$$\frac{P_{ry}}{P_0} = -9.64 \times 10^{-4} + 9.69 \times 10^{-3} \ln \frac{(y-25)^2 + r^2}{(y+25)^2 + r^2}$$

預測在不同半徑 (r) 及深度 (y) 下，土壤所承受之壓力。

3. 噴口在地表下 45cm 時，可應用

$$\frac{P_{ry}}{P_0} = -5.89 \times 10^{-4} + 7.20 \times 10^{-3} \ln \frac{(y-45)^2 - r^2}{(y+45)^2 - r^2}$$

預測在不同半徑 (r) 及深度 (y) 下，土壤所承受的壓力。

4. 噴口位於地表下 25cm 時，其壓縮空氣 ($10\text{kg}/\text{cm}^2$) 破壞土壤之有效深度為 30cm 。

噴口位於地表下 45cm 時，其壓縮空氣 ($10\text{kg}/\text{cm}^2$) 破壞土壤之有效深度為 40cm 。

Abstract

Forcing the compressed air into soil with a pneumatic cultivator in subsoil cultivation to improve the soil structure and increase the productivity is proved to be a useful way. So far, the complete theory about the pressure distribution in soil due to the compressed air has not been developed. This experiment is devoted to designing and testing a

system which can simulate the actual soil conditions in field. The main purpose of this study is to investigate the pressure distribution in soil based on the horizontal distance and vertical depth from the nozzle. The investigated results is used to improve the scheme of cultivation with a pneumatic cultivator.

This study shows:

1. In the pneumatic cultivator, the air pressures are 10kg/cm² (980kpa) inside the compressor and 9.19kg/cm² (900kpa) at the nozzle.
2. When the nozzle is located at 25cm under the ground, the correlation to predict local pressures is:

$$\frac{P_{ry}}{P_0} = -9.64 \times 10^{-4} + 9.69 \times 10^{-3} \ln \frac{(y-25)^2 + r^2}{(y+25)^2 + r^2}$$

3. When the nozzle is located at 45cm, the correlation is:

$$\frac{P_{ry}}{P_0} = -5.89 \times 10^{-4} + 7.20 \times 10^{-3} \ln \frac{(y-45)^2 + r^2}{(y+45)^2 + r^2}$$

4. When the nozzle is at 25cm under the ground, the compressed air can break the soil to 30cm effectively, and the nozzle at 45cm can break the soil to 40cm.

一、前 言

耕耘 (Tillage) 作業，係為翻轉或鬆動土壤之一種操作。陳振鐸^(1,2)、郭魁士⁽³⁾、Daniel Hillel⁽³²⁾ 等指出，耕耘之主要目的為改善土壤之結構，以利於作物根羣之發育；H. Kuipers⁽³⁶⁾ 亦認為耕耘作業主要是為了使作物獲得較高的產量。作物在種植前，農場一般均先行耕耘整地，如果是多年生之作物，當作物種植後，土壤經過機械與人畜等長期之踏壓，孔隙逐漸減小，通氣性變差，土壤結構變硬，因而會阻碍作物根羣的發育^(2,23)。Albert C. Trowse⁽²⁹⁾ 經過實驗證明，傳統的犁耕作業，長期使用板犁 (Moldboard plow)，圓盤犁 (Disk plow)，或迴轉犁 (Rotary plow) 後，會導致土壤產生硬盤 (Hard pan)，使得作物之根羣發育不良，引致作物產量之降低。因此，Albert C. Trowse 與 H. Kuipers 認為作物種植以後必需實施中耕 (Cultivation) 作業，尤其是多年生之深根性作物，適當的中耕作業對提高作物之產量有密切的關係。M. J. Goss⁽⁴³⁾ 亦強調中耕作業為作物生長過程中，改善土壤物理條件，促進根羣發育之主要技術。

H. Kuipers⁽³⁶⁾ 指出實施中耕作業時，應考慮欲中耕之深度、中耕機具之型式、土壤被破壞後之

力學分析，以及實施中耕作業後作物產量提高之調查。一般農民使用之中耕機具，主要的有齒狀中耕器 (Rigid tine cultivator)、迴轉式中耕器 (Rotary cultivator)、振動式中耕器 (Vibrating cultivator) 等。H. W. Chandler⁽³⁷⁾ 謂，當實施中耕作業時，土壤承受外力以後，將會使得土壤結構產生變化，土壤被破壞之程度與外力成正比。關於齒狀中耕器，J. V. Stafford^(38,39,40) 曾建立數學模式以預測土壤被破壞時承受之作用力情形。R. J. Godwin⁽⁴⁴⁾ 亦曾研究過齒狀中耕器破壞土壤之現象。波沢榮、川村登^(15,16,17)、坂井純⁽¹⁰⁾ 等，對於迴轉式中耕器實施深耕作業時，土壤被破壞切削形成向後運動之力學模式，以及所耗能量與最適用中耕刀之設計等，有深入之研究。M. J. Butson⁽⁴²⁾、李基明^(11,12,13)、酒井憲司^(18,19) 等，對於振動式中耕器，亦以數學模式分析其土壤內部作用力與所消耗能量之關係。以上三種傳統式之中耕器，各有許多學者作深入之研究，然而，其共同之缺點為：(1) 中耕之深度有限，一般約在 20cm 以內，無法達到硬盤之深度 (至少 30cm)。 (2) 每具中耕器作業寬度有限，未經中耕器作用之土壤，仍然堅硬。(3) 所消耗能量大。

近年來，新發展出一種被認為是突破傳統方式的深層中耕機械——噴氣式深耕機 (Pneumatic

cultivator)，如圖1所示。它是利用壓縮空氣（ $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ）於土壤深層（ 45cm ）瞬間釋放出，以達深層中耕效果的機械。本機械實施深耕後，對於作物產量及品質的影響，與一般傳統式中耕器之比較，岩崎一男⁽¹⁴⁾、島根縣農業試驗場⁽²⁰⁾、農業生產工學研究會⁽²⁸⁾、以及本文作者^(4,5,6,7,8)等，亦曾分別作深入的田間試驗研究，證實此種噴氣式深耕機對作物之發育及產量較傳統式之中耕器有更好的影響。

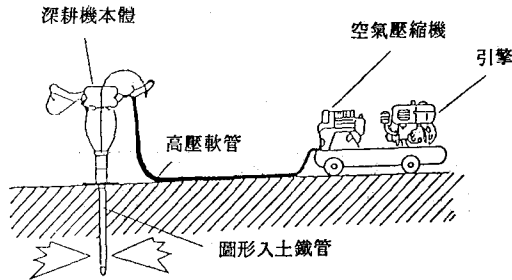


圖1. 噴氣式深耕機
Fig 1. Pneumatic cultivator

然而，有關壓縮空氣破壞土壤後，在土壤內流動之現象，與土壤所承受壓力之變化情形等理論資料，因為涉及流體及土壤之特性，迄今尚未發展出一套完整之基礎理論。歐美是大農場制，行粗放經營，中耕作業大部分為使用曳引機牽引齒狀中耕器行之，故缺乏上述之具體資料；只有日本之木谷收⁽⁹⁾、新家憲司^(21,22,23,24,25,26,27)等人作過一些基礎之研究。因之，進一步探討壓縮空氣對土壤之作用情形，以提供更具體之資料，作為改善中耕作業之理論依據，此乃當務之急。

二、研究目的

本研究之目的，在理論上進一步探討噴氣式深耕機實施噴氣深耕作時，距離噴口不同半徑與深度下，壓縮空氣在土壤內之壓力分佈情形與空氣流動現象，以提供更具體之資料，作為改善中耕作業之理論依據。

三、理論探討

關於空氣在土壤中之流動狀況及其壓力分佈情形，Daniel Hillel⁽³²⁾、木谷收⁽⁹⁾、新家憲司^(21,22,23,24,25,26,27)等人分別做過基礎研究。

(-)Daniel Hillel 假設土壤中之空氣為對流狀態，則依Darcy's law.

$$q_v = -(k/\mu)(dp/dx) \dots \dots \dots (1)$$

式中， q_v ：土壤中空氣之體積流率
 k ：空氣穿透毛細管之滲透率，
 (透氣性)
 μ ：土壤中空氣之粘度
 p ：土壤中空氣之壓力
 x ：毛細管長度

(.)式若表為質量流率，則可改寫為
 $q_m = -(\rho k/\mu)(dp/dx) \dots \dots \dots (2)$

式中 q_m ：土壤中空氣之質量對流率
 ρ ：土壤中空氣之密度

因為 $pV = n^*RT$, $\rho = \frac{M}{V}$,

$$\therefore \rho = (m/RT)p \dots \dots \dots (3)$$

式中 V ：體積
 n^* ：氣體摩爾 (mole) 數
 R ：氣體常數/mole
 T ：絕對溫度
 M ：質量，($M = n^* \cdot m$)
 m ：摩爾重

對於可壓縮性流體之連續方程式 (Continuity equation) 為 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial q_m}{\partial x} \dots \dots \dots (4)$

將(3)式中之 ρ 及(2)式中之 q_m 代入(4)式中，可得

$$\frac{m}{RT} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (5)$$

若空氣噴入土壤中之壓力很小時， $\rho k/\mu$ 為常數，此時 kRT/m 亦為一常數，令 $C = kRT/m$ ，則(5)式可表為

$$\frac{\partial p}{\partial t} = C \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \dots \dots \dots (6)$$

(6)式乃為空氣流量小，且壓力小時，空氣在土壤中流動之壓力分佈情形。

(-)木谷收假設空氣為非粘性，忽略其質量，當空氣在土壤表面向土壤內部噴出時，則噴出之空氣會產生漩渦，其噴流作用之 Vorticity 傳播方程式可表為

$$u \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\omega^*}{r} \right) + v \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\omega^*}{r} \right) = 0 \dots (7)$$

渦度 (Vorticity) ω^* 為

$$\omega^* = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r} \dots \dots \dots (8)$$

式中 u ：x 方向流速
 v ：y 方向流速

r : 半徑
 ω^* : 渦度, (Vorticity)

應用自由噴流理論可逐步求出空氣在土壤中之流速

$$U^* = \frac{1}{R_r} \frac{\partial \phi}{\partial Z}, \quad V^* = -\frac{1}{R_r} \frac{\partial \phi}{\partial R_r} \dots (9)$$

式中 U^* : x 方向無因次流速。

V^* : y 方向無因次流速。

ϕ : 沿噴口中心之速度分佈函數

$$Z = \frac{z}{R_s} = \frac{z}{0.1696H}$$

H : 噴口位於土壤表面上之距離

$$R_s = 0.1696H$$

R_r : 無因次半徑, $R_r = \frac{r}{R_s}$

(⇒) 新家憲司等人探討壓縮空氣在土壤中噴出後之流動及其壓力分佈情形, 他模擬實際田間狀況, 設計了如圖 2 所示之實驗土槽裝置系統。土槽之規格為 $100 \times 50 \times 50 \text{cm}$ 。

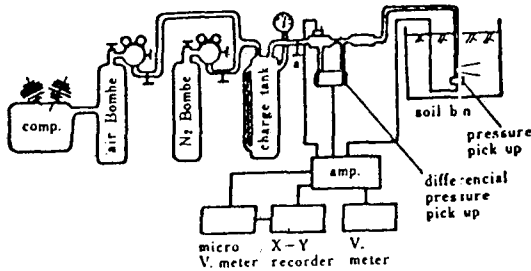


圖 2. 新家憲司之實驗裝置

Fig 2. The experimental device of Kenji ARAYA.

他假設土槽內之土壤質地均一, 在實際的土壤層中, 因為土壤中含有水分, 故土壤內空氣之流動應考慮毛細管現象, 如圖 3 所示。

若毛細管中沒有土壤與水分, 只有空氣流過時, 依 Fanning equation, 可得

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma l} = \frac{2}{3} f \frac{v_a^2}{2gd} \dots (10)$$

式中 P_1 : 空氣在毛細管入口之絕對壓力, g/cm^2 。

P_2 : 空氣在毛細管出口之絕對壓力, (一般為大氣壓力), g/cm^2 。

$P_1 - P_2 = P_f$: 壓力差, g/cm^2

l : 毛細管長度, cm

f : 摩擦係數

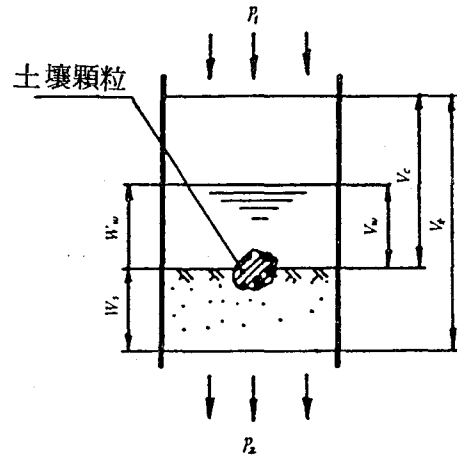


圖 3. 土壤中毛細管內空氣流動情形

Fig 3. The movement of air in the soil pore.

v_a : 空氣流速, cm/sec

g : 重力加速度, 980cm/sec^2

γ : 空氣之比重, g/cm^3 (密度)

d : 毛細管徑, cm

新家憲司推薦一個計算土壤中毛細管徑 (d) 之公式, 但在有關之土壤物理特性文獻上^(2,3,31,32, 5,47), 亦可用其它方法求得 d 值。茲以新家憲司推薦之

$$d = \frac{V_c - V_w}{V_t(1 - \epsilon_a)S_v} = \frac{\epsilon_a}{(1 - \epsilon_a)S_v} = \frac{\epsilon(1 - s)}{(1 - \epsilon + \epsilon s)S_v}$$

代入(10)式中, 可求得在實際的土壤層中, 毛細管內含有水分與土壤時, 在進出口間空氣之壓力差為

$$P_1 - P_2 = P_f = f \cdot \frac{(v_a^*)^2 \cdot \gamma \cdot l \cdot S_v}{3g} \cdot \frac{(1 - \epsilon + \epsilon s)}{\epsilon^3(1 - s)^3}$$

$$= f \cdot \frac{G^2 \cdot l \cdot S_v}{3g\gamma} \cdot \frac{(1 - \epsilon + \epsilon s)}{\epsilon^3(1 - s)^3} \dots (11)$$

式中 ϵ : 孔隙率, $\epsilon = V_c/V_t$

ϵ_a : 空氣率, $\epsilon_a = (V_c - V_w)/V_t = \epsilon(1 - s)$

s : 飽和度, $s = V_w/V_t = 1 - (\epsilon_a/\epsilon)$

V_t : 全容積, cm^3

V_c : 水分與空氣所占之容積, cm^3

V_w : 水分所占之容積, cm^3

S_v : 含有水分之土壤粒子之比表面積, cm^2/cm^3

G : 重量流率, $\text{g/sec} \cdot \text{cm}^2$, $G = \gamma v_a^*$

v_a^* : 含有土壤顆粒之毛細管內空氣之流速, cm/sec

當進行壓縮空氣噴於土槽中之實驗時，若考慮空氣之流動為三度空間現象，則噴口處（0點）之空氣，其流動方向如圖4所示，其壓力變化情形應用(11)式可表為

$$-\text{grad } p = f \cdot \frac{\gamma S_v}{3g} \cdot \frac{(1-\varepsilon+\varepsilon s)}{\varepsilon^3(1-s)^3} |V| \cdot V \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{grad } p = \gamma p \left(\frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$|v| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

u, v, w : 表示在 x, y, z 方向之流速，
cm/sec²

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$: 表示在 x, y, z 方向之單位向量。

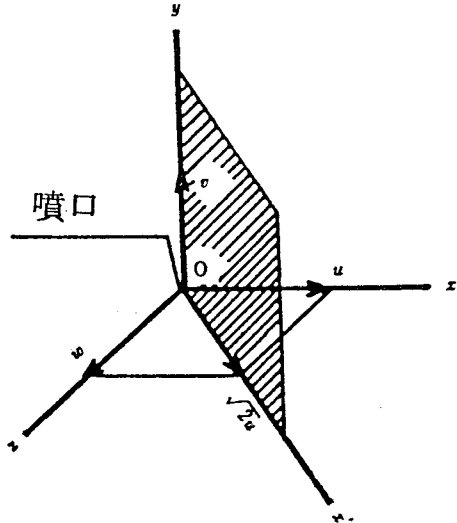


圖4. 噴口處空氣之流動方向
Fig 4. The direction of air movement at the nozzle.

空氣在土壤中之流動現象若為層流，雷諾數 $Ren < 20$ 時，則空氣流動速度與其壓力之關係，可依 Darcy's law 表為

$$-\frac{K}{\gamma} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k} \right) = \vec{V} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$K = \frac{18\gamma}{C_s \mu S_v^2} \cdot \frac{\varepsilon^3(1-s)^3}{(1-\varepsilon+\varepsilon s)^2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中 C_s : 土壤中之常數，對大部分土壤而言，
 $C_s = 100^8$

μ : 粘性係數，g·sec/cm²

K : 透水係數，m/sec

在試驗裝置中，因為空氣之流動現象對稱於 y 軸， $\therefore u = w$ ， $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial z}$ ，因此，為了簡化空氣流動現象之分析工作，假設介於 x 軸和 z 軸之間 45° 位置有一 x' 軸，它與 y 軸形成 x'y 平面，故流速 u 和 w 之合成流速在 x'y 平面上成為 $\sqrt{2}u$ ，故可將原來空氣於 0 點作放射狀噴出的三度空間流動狀態，轉換為二度空間 (x'y 平面上) 之流動狀態。

噴口位置 (0 點) 發生之壓力，經過轉換後可表為

$$p_0(p_0 + 2p_2) = \alpha \cdot \beta \cdot G \cdot g \cdot \frac{R \cdot T \cdot C_s \cdot \mu \cdot S_v^2}{9} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{(1-\varepsilon+\varepsilon s)}{\varepsilon^3(1-s)^3} \ln \frac{2d_0}{r_0} \quad \dots\dots\dots (17)$$

- 式中 p_0 : 噴口位置空氣之錶壓力， p_a
 R : 氣體常數，29.27m/°k
 T : 絕對溫度，°k
 d_0 : 噴口在地表下之深度，cm
 r_0 : 噴口之半徑，cm
 α : 位置常數，m⁻¹
 $\alpha = \ln[(1.078 \times 10^{-4}/r_0) + 1.006 \times 10^{-2}]$
 β : 亂流係數，
 當 $Ren \geq 20$ 時 (亂流)，
 $\beta = (Ren/20)^{0.4}$
 當 $Ren < 20$ 時 (層流)， $\beta = 1$
 Ren : 噴口位置之雷諾數

$$Ren = \frac{6G}{\pi r_0^2 (1-\varepsilon+\varepsilon s) S_v \mu}$$

壓縮空氣在土槽中噴出後，於 x'y 平面上不同之 (x'y) 座標下，土壤所承受之壓力 $p_{x'y}$ 可表為

$$p_{x'y} = \varphi \frac{\alpha \cdot G \cdot g}{2K} \ln \frac{(y-d_0)^2 + (\sqrt{2}x)^2}{(y+d_0)^2 + (\sqrt{2}x)^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中，當 $Ren < 20$ 時， $\varphi = 1$

當 $Ren \geq 20$ 時， $\varphi = \frac{1}{C_s} (a + b +$

Res)
 a, b 為常數，

$$Res = \frac{6|\vec{V}| \rho}{(1-\varepsilon+\varepsilon s) \cdot S_v \cdot \mu}$$

Res : 土槽內各點之雷諾數

(17)式與(18)式為新家憲司所做土槽實驗中，推演出求取土壤內各點壓力分佈之理論模式。

爲了進一步探討壓縮空氣在土壤中之作用情形，作者採用新家憲司之理論基礎，設計一實驗裝置並進行實驗。

四、實驗裝置與方法

本研究所使用之重要儀器設備，實驗之裝置，以及進行實驗之方法與步驟等，分項說明如下：

(一) 儀器設備：

1. 噴氣式深耕機整套設備：它包括汽油引擎 GED BS—2 型，空氣壓縮機 BC—2 型，深耕機本體等，如圖 1 所示。它使用之壓縮空氣爲 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ，噴口距地表下之深度最深可達 45cm。
2. 土壤壓力測定器 (Soil pressure sensor) : KD—10D 型，容量爲 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ，測定器圓盤外徑爲 10cm，內裝有應變計，可感應之直徑爲 7.8cm。
3. 動應變放大器 (Dynamic strain amplifier): KYOWA DPM—3E6B 型，可同時放大 6 個信號。
5. 天平：OHAUS 槓桿式微動天平，靈敏度爲 $\pm 0.1\text{g}$ ，容量爲 2,610g，它用來稱土壤重量。
6. 烘箱：中部電機公司 R80 型，溫度範圍爲 $0\sim 350^\circ\text{C}$ ，250Volt，2.5kw，11Amp，它用來烘乾土壤，以求土壤之含水率。
7. 攪拌器：高速迴轉 (16,000rpm) 攪拌土壤溶液，作土壤機械分析時用之。
8. 比重計：Bouyoucos Scale ASTM 152H，刻度從 0~60 作土壤機械分析時用之。

(二) 實驗裝置

爲了測定噴氣式深耕機所產生之壓縮空氣在土壤中噴出後，土壤中不同位置所承受之壓力大小分佈情形，本研究設計了一理論研究之實驗裝置系統，如圖 5 所示。

引擎①驅動空氣壓縮機②，產生之壓縮空氣 ($10\text{kg}/\text{cm}^2$) 經高壓軟管貯存於深耕機本體③中，當壓縮空氣於噴口④噴出時，土槽⑨內不同位置之土壤壓力測定器⑤感應到作用力，經 Wheastone 電橋盒⑥轉換爲電阻之信號，傳至動應變放大器⑦，將信號放大，再接到動應變記錄器⑧上，可將此作用力描繪在記錄器上，最後經過校正與換算後，即可求得測定器所感應之壓力大小。

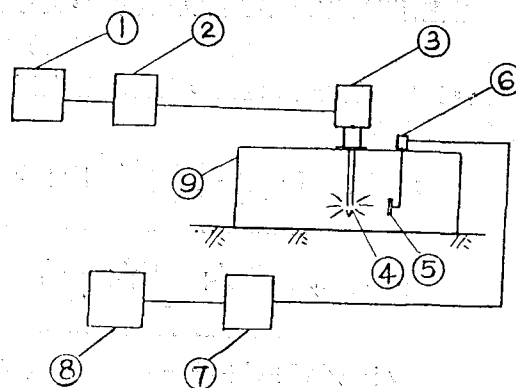


圖 5. 實驗裝置系統示意圖

Fig 5. The schematic diagram of the experimental device.

(三) 方法與步驟

1. 土槽之製作

爲了便於埋設土壤壓力測定器及分析壓縮空氣在土壤中之作用情形，本實驗以 #5 號鐵絲網製作一直徑 160cm，高 60cm 之土槽，以模擬實際之田間土壤狀況。

2. 填 土

將土壤逐漸填充至土槽內，每填充 5cm 時，以土壤鎮壓器將土槽內之土壤均勻地鎮壓，壓實之標準爲模擬實際田間土壤之狀況，以小型貫穿阻力測定器貫入之刻度與實際田間相對深度所貫入之刻度相同爲準。

3. 埋設土壤壓力測定器

在填充土壤之同時，以圓心爲基準，於半徑方向取 8 點 ($r = 10, 20, \sim 80\text{cm}$)，另以土槽最表層爲基準，深度方向取 5 點 ($y = -10, -20, \sim -50$)

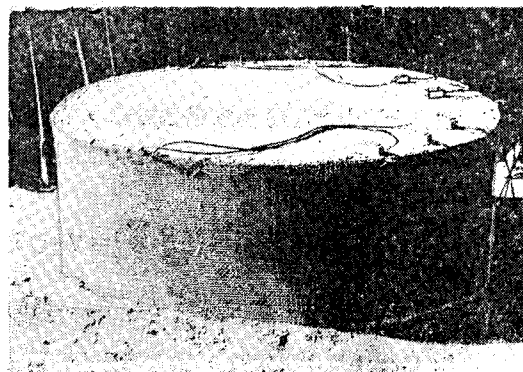


圖 6. 製作完成之土槽

Fig 6. The test soil bin

cm)，按所選取之位置埋設土壤壓力測定器，以求取在不同半徑與不同深度下土壤承受之壓力。製作完成後之土槽如圖 6 所示。

4. 安裝其他儀器

按圖 5 所示之實驗裝置系統，逐項安裝好各項測定儀器與設備，

5. 進行噴氣式深耕機噴氣深耕實驗

發動噴氣式深耕機，將深耕機本體之圓形入土鐵管打入土壤中，使噴口位於地表下 25cm 處，當深耕機本體之壓縮空氣達 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，瞬間釋放本體內之壓縮空氣，則可靠土壤壓力測定器及動應變放大器，動應變記錄器等測出在不同之半徑及深度下，土壤承受之壓力。同理，另外製作土槽，測定噴口位於地表下 45cm 處，土槽內各點所承受之壓力。

6. 重複上項實驗三次，土槽內各點之壓力大小為三次實驗值之平均。

7. 隨機採取土壤樣本 (50g) 10 個，以液體比重法，請土壤系作機械分析，測定實驗土壤之質地。

8. 隨機採取土壤樣本 20 個，測定其含水率。

五、結果與討論

(一) 深耕機本體在土壤內噴出口位置之壓力計算

本實驗裝置系統中，深耕機本體內貯存之壓縮空氣為 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 。然而，經過控制閥及圓形入土鐵管進入土壤中，於土壤中噴出之壓力應低於 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ，在噴口噴出之壓力，可按「壓縮空氣於收斂——發散型噴嘴」之運動模式^(33,34,41,45)，予以計算出。今扼要說明計算之過程如下：

參考圖 7，壓縮空氣在深耕機本體之貯氣筒①中，經球形閥所控制之孔口②，通過長 45cm 之噴管，而於噴管出口③將此壓縮空氣噴至外界土壤④中。此種壓縮空氣之流動，按空氣壓縮系統特性知，摩擦效應及熱傳損失皆可忽略不計，故此真實氣體可以等熵流 (isentropic flow) 來描述之，它可利用氣體動力學「收斂——發散型噴嘴」模型解析之 (如圖 8 所示)。

下列各計算式中所應用之符號意義如下：

M*: March number.

n: 物質其等壓比熱與等容比熱之比值，即

$n = C_p/C_v$ ，空氣之 n 為 1.4

P: 空氣壓力， kg/cm^2 。

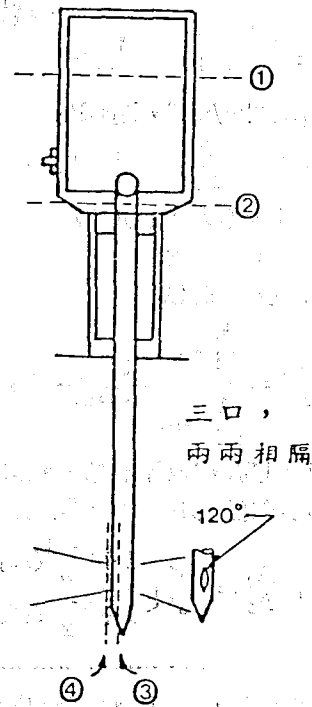


圖 7. 深耕機本體中壓縮空氣發生狀態變化之四個階段

Fig 7. The four stages of compressed air in the pneumatic cultivator.

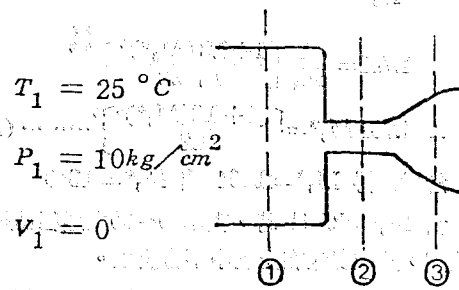


圖 8. 收斂——發散型噴嘴

Fig 8. Converging—diverging nozzle.

P*: 靜滯狀態之壓力， kg/cm^2

F: 作用力，kg

A: 截面積， m^2

在孔口②處， $M_2^* = 1$ ，

$$\text{由公式 } \frac{P_2}{P_{t2}} = \left[\frac{1}{1 + \frac{n-1}{2} (M_2^*)^2} \right]^{\frac{n}{n-1}} \dots (19)$$

$$\therefore \frac{P_2}{P_1} = \left[\frac{1}{1 + \frac{1.4-1}{2} \times 1^2} \right]^{1.4} = 0.528$$

$$\therefore P_{t1} = 10 \text{ kg/cm}^2, P_{t1} = P_{t2}$$

$$\text{由公式 } P_2 = \frac{P_2}{P_{t2}} \cdot \frac{P_{t2}}{P_{t1}} \cdot P_{t1} \dots \dots \dots (20)$$

$$\therefore P_2 = (0.528)(1)(10) = 5.28 \text{ kg/cm}^2$$

在噴口③處之總壓力

$$P_3 = \frac{F_3}{A_3} = \frac{\sum_{i=1}^3 F_{(i)}}{\sum_{i=1}^3 A_{(i)}} = \frac{3F_{(i)}}{3A_{(i)}} = P_{(i)}$$

其中 $i=1,2,3$ ，分別代表第一、第二、第三方向之噴口，故知任一方向噴口之壓力皆為 F_3 ，

$$\text{由公式 } \frac{A_3}{A_2} = \frac{M_2^*}{M_3^*} \left[\frac{1 + \frac{n-1}{2}(M_3^*)^2}{1 + \frac{n-1}{2}(M_2^*)^2} \right]^{\frac{n+1}{2(n-1)}} \dots \dots \dots (21)$$

已知 $M_2 = 1$ ， $n = 1.4$ ，又因②處噴管內徑為 1.62cm，③處近似橢圓，其長軸為 1.52cm，短軸為 1cm，

$$\text{故 } \frac{A_3}{A_2} = \frac{\frac{\pi(1.52)(1.0)}{4} \times 3}{\frac{\pi(1.62)^2}{4}} = 1.781,$$

將 $\frac{A_3}{A_2} = 1.781$ 代入(21)式，得

$$1.781 = \frac{1}{M_3^*} \left[\frac{1 + 0.2(M_3^*)^2}{1 + 0.2} \right]^{\frac{2.4}{0.8}}$$

$$\therefore 1.781 M_3^* = \left[\frac{1 + 0.2(M_3^*)^2}{1.2} \right]^3 \dots \dots \dots (22)$$

解(22)式得 $M_3^* = 2.064$ 或 $M_3^* = 0.349$

當 $M_3^* = 2.064$ 時，表示②~③之過程為超音速狀態，此種現象在土壤中不會發生。

當 $M_3^* = 0.349$ 時，表示②~③之過程為次音速狀態。

$$\text{故 } \frac{P_3}{P_{t3}} = \left[\frac{1}{1 + \frac{n-1}{2}(M_3^*)^2} \right]^{\frac{n}{n-1}} \dots \dots \dots (23)$$

$$\therefore \frac{P_3}{P_{t3}} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{1.4-1}{2}\right)(0.349)^2} \right]^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 0.919$$

$$\therefore P_{t3} = P_{t1}$$

$$\begin{aligned} \therefore P_3 &= \frac{P_3}{P_{t3}} \cdot \frac{P_{t3}}{P_{t1}} \cdot P_{t1} \\ &= (0.919)(1)(10) \\ &= 9.19 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

由以上之計算，可知當深耕機本體之壓力為 10 kg/cm² (980kpa) 時，在其噴口處之壓力為 9.19 kg/cm²，亦即表示土槽中實施噴氣之實驗時，壓縮空氣在噴口處之噴出壓力為 9.19 kg/cm² (或 900kpa)。

(二) 壓力分佈之理論推演

假設本實驗所用之土壤，其質地均勻，則本實驗所應用以分析土槽內不同半徑與深度下，土壤所承受壓力大小分佈之數學模式，可應用新家憲司之理論，綜合公式(16)，(17)，(18)而推演出。

$$\text{由公式(16) } p_{xy} = \varphi \frac{\alpha \cdot G \cdot g}{2K}$$

$$\ln \frac{(y-d_0)^2 + (\sqrt{2}x)^2}{(y+d_0)^2 + (\sqrt{2}x)^2}$$

本實驗中，土槽是圓形的，故在(16)式中之 $\sqrt{2}x$ 應以半徑方向 r 取代之，故(16)式應改為

$$p_{ry} = \varphi \frac{\alpha \cdot G \cdot g}{2K} \ln \frac{(y-d_0)^2 + r^2}{(y+d_0)^2 + r^2} \dots \dots \dots (24)$$

由公式(16)中， $K = \frac{18\rho g}{C_s \mu S_v^2} \cdot \frac{\varepsilon^3(1-s)^3}{(1-\varepsilon+\varepsilon s)^2}$ 代入公式(17)中，得

$$p_0(p_0 + 2p_2) = \alpha \cdot \beta \cdot G \cdot g \cdot \frac{R \cdot T \cdot C_s \cdot \mu \cdot S_v^2}{9}$$

$$\cdot \frac{(1-\varepsilon+\varepsilon s)}{\varepsilon^3(1-s)^3} \ln \frac{2d_0}{r_0}$$

$$= \frac{(1-\varepsilon+\varepsilon s)^2}{\varepsilon^3(1-s)^3} \cdot \frac{C_s \mu S_v^2}{18\rho g}$$

$$\cdot \frac{2\rho g^2 \alpha \cdot \beta \cdot G \cdot R \cdot T}{(1-\varepsilon+\varepsilon s)} \ln \frac{2d_0}{r_0}$$

$$= \frac{2\rho g^2 \alpha \beta G R T}{K(1-\varepsilon+\varepsilon s)} \ln \frac{2d_0}{r_0}$$

$$\therefore K = \frac{2\rho g^2 \alpha \beta G R T}{p_0(p_0 + 2p_2)(1-\varepsilon+\varepsilon s)} \ln \frac{2d_0}{r_0} \dots (25)$$

將(25)式代入(24)式中，得

$$p_{ry} = \varphi \left(\frac{p_0(p_0 + 2p_2)(1-\varepsilon+\varepsilon s)}{4\rho g^2 \alpha \beta G R T \ln \frac{2d_0}{r_0}} \right) \cdot$$

$$\alpha \cdot G \cdot g \cdot \ln \frac{(y-d_0)^2 + r^2}{(y+d_0)^2 + r^2}$$

$$= \frac{p_0(p_0 + 2p_2) \varphi (1-\varepsilon+\varepsilon s)}{4\rho \cdot g \cdot \beta \cdot R \cdot T \ln \frac{2d_0}{r_0}} \cdot$$

$$\ln \frac{(y-d_0)^2 + r^2}{(y+d_0)^2 + r^2} \dots \dots \dots (26)$$

式(27)中，因為 p_0 為土壤中噴口之出口壓力（已求出為 900kpa）， p_2 為大氣壓力，故 p_0+2p_2 之值應為常數，設為 C^* 值。今考慮 p_{ry} 與 p_0 之關係，將式(27)之 p_0 移項至左邊，化為無因次之關係式為

$$\frac{p_{ry}}{p_0} = \frac{\varphi \cdot C^* (1 - \varepsilon + \varepsilon s)}{4 \rho g \beta R T \ln \frac{2d_0}{r_0}} \ln \frac{(y-d_0)^2 + r^2}{(y+d_0)^2 + r^2} = B^* \ln \frac{(y-d_0)^2 + r^2}{(y+d_0)^2 + r^2} \dots \dots \dots (27)$$

式(28)中

$$B^* = \frac{\varphi \cdot C^* (1 - \varepsilon + \varepsilon s)}{4 \rho g \beta R T \ln \frac{2d_0}{r_0}}$$

B^* 可由空氣、土壤及實驗裝置之特性而經運算求出其確實之數值。

測定土槽內各點土壤所承受之壓力時，若在理想狀況下，所有誤差均不發生，則公式(28)為本實驗所推演用以分析在土壤內距噴口不同位置時，土壤承受壓力大小之理論模式。

然而，在本實驗進行中，由於土壤本身存在之應力、測量儀器之精確度、實驗裝置之特性、人

為誤差等因素均會影響到實驗之準確性。因此，在公式(28)之理論論模式中，必需考慮增加另外一常數項 A^* ，以表示各項累積之誤差，故式(28)之理論模式應改寫為下式才趨合理，

$$\frac{p_{ry}}{p_0} = A^* + B^* \ln \frac{(y-d_0)^2 + r^2}{(y+d_0)^2 + r^2} \dots \dots \dots (28)$$

式(28)即為本實驗所推演，在實施噴氣深耕作業時，距噴口不同半徑與深度下，土壤承受壓力大小之理論模式。式中 A^* 值與土壤本身應力、儀器固定修正值、實驗裝置之特性（如噴口壓力、位置、大小……等）、人為誤差等有關。

(三) 實驗結果

本實驗所用之土壤，經過取樣作機械分析，其粘粒占 20.76%、粉粒占 51.9%、砂粒占 27.34%，查土壤質地三角圖，得知土槽實驗之土壤為粉質壤土 (Silt loam)。含水率經測定後，求得其平均含水率為 14.73%。

本實驗測得噴口位於地表下 25cm 及 45cm 時，土槽中距噴口不同半徑 (r) 及深度 (y) 下，土壤承受壓力之大小分佈，如表 1 與表 2 所示。

表 1. 噴口在地表下 25cm，土槽內不同半徑與深度下各點之壓力分佈 (kpa)

Table 1. The pressure distribution (kpa) as the nozzle is at 25cm under the ground.

深度 (y) cm	半 徑 (r) , cm							
	10	20	30	40	50	60	70	80
-10	18.00	18.00	19.53	10.48	8.31	5.39	4.49	2.83
-20	50.80	22.46	11.98	10.25	7.67	3.59	2.77	1.89
-30	37.70	23.07	12.70	8.88	5.91	3.40	2.95	1.37
-40	6.07	3.94	3.77	3.14	2.42	2.42	0.31	0.31
-50	3.77	2.95	1.58	1.58	1.52	1.52	0.29	0.29

表 2. 噴口在地表下 45cm，土槽內不同半徑與深度下各點之壓力分佈 (kpa)

Table 2. The pressure distribution (kpa) as the nozzle is at 45cm under the ground.

深度 (y) cm	半 徑 (r) , cm							
	10	20	30	40	50	60	70	80
-10	8.98	8.31	10.34	9.70	5.46	3.59	2.77	0.29
-20	18.01	13.66	10.48	10.17	7.67	2.95	2.77	0.72
-30	29.82	13.84	11.98	10.52	10.48	3.40	2.95	0.72
-40	37.65	18.52	10.99	9.41	3.34	3.04	0.88	0.84
-50	25.10	9.72	4.43	3.04	2.95	1.58	0.31	0.31

將表 1.之實驗數據，以公式(28)之理論模式表示之，可求得噴口位於地表下 25cm 時，土壤內不同半徑 (r) 與深度 (y) 下，各點承受之壓力 (P_{ry}) 與噴口壓力 (p₀) 的迴歸關係式如下：

$$\frac{P_{ry}}{P_0} = -9.64 \times 10^{-4} + 9.69 \times 10^{-3} \frac{\ln \frac{(y-25)^2 + r^2}{(y+25)^2 + r^2}}{\dots} \dots \dots (29)$$

同理，將表 2.之實驗數據，以公式(28)之理論模式表示之，亦可求得噴口位於地表下 45cm 時之迴歸關係式如下：

$$\frac{P_{ry}}{P_0} = -5.89 \times 10^{-4} + 7.20 \times 10^{-3} \frac{\ln \frac{(y-45)^2 + r^2}{(y+45)^2 + r^2}}{\dots} \dots \dots (30)$$

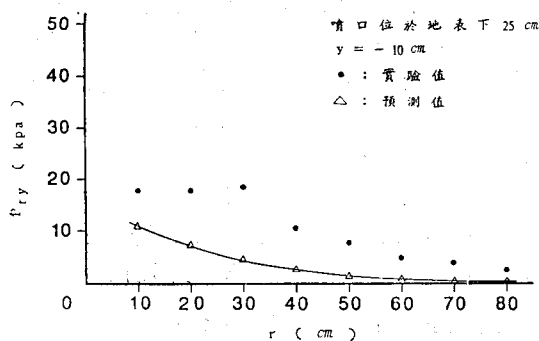


圖 9. 噴口位於地表下 25cm，y = -10cm 時，土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 9. The pressure distribution in soil at d₀=25cm，y = -10cm.

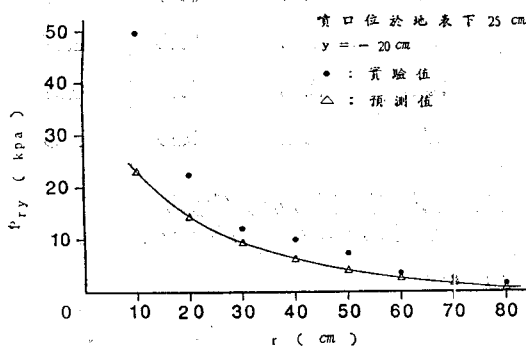


圖 10. 噴口位於地表下 25cm，y = -20cm 時，土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 10. The pressure distribution in soil at d₀=25cm，y = -20cm.

公式(29)與(30)中，p₀=9.19kg/cm²=900kpa，若將表 1.之資料，分別在五種不同的深度下 (y = -10, -20, ~-50cm)，探討土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形，可繪成所示之圖 9 ~ 圖 13，圖中之預測值乃依(29)式而來。

同理，將表 2.之資料，分別在五種不同的深度下 (y = -10, -20, ~-50cm)，探討土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形，亦可繪成所示之圖 14 ~ 18，圖中之預測值乃依(30)式而來。

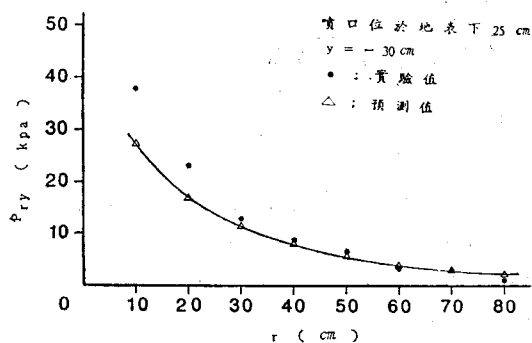


圖 11. 噴口位於地表下 25cm，y = -30cm 時，土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 11. The pressure distribution in soil at d₀=25cm，y = -30cm.

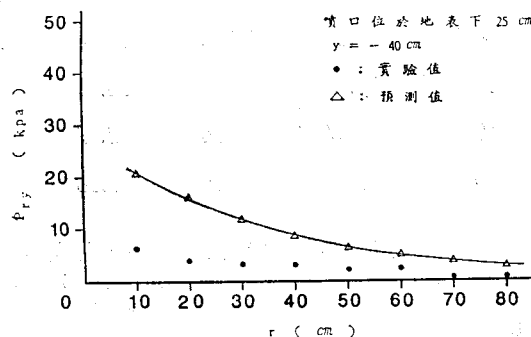


圖 12. 噴口位於地表下 25cm，y = -40cm 時，土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 12. The pressure distribution in soil at d₀=25cm，y = -40cm.

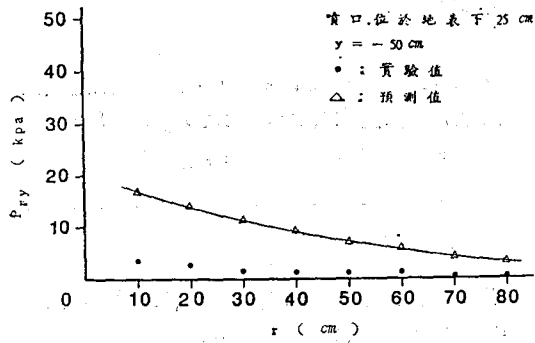


圖13. 噴口在地表下25cm, $y = -50$ cm 時, 土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 13. The pressure distribution in soil at $d_0=25$ cm, $y = -50$ cm.

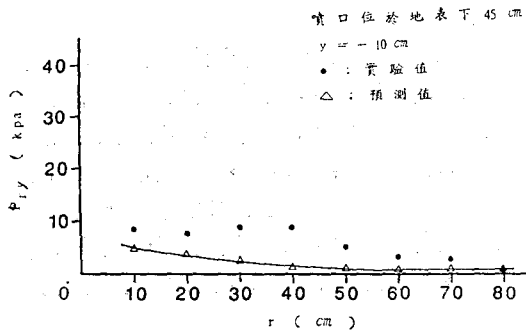


圖14. 噴口在地表下45cm, $y = -10$ cm 時, 土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 14. The pressure distribution in soil at $d_0=45$ cm, $y = -10$ cm.

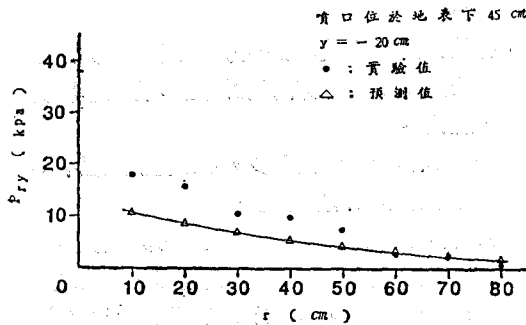


圖15. 噴口在地表下45cm, $y = -20$ cm 時, 土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 15. The pressure distribution in soil at $d_0=45$ cm, $y = -20$ cm.

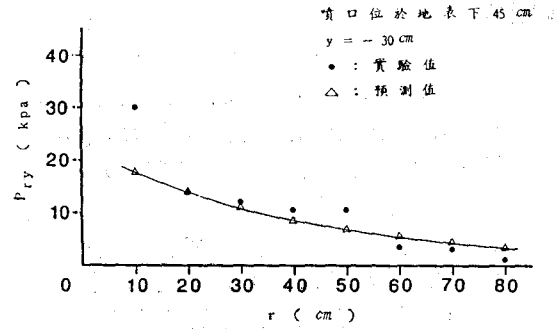


圖16. 噴口在地表下45cm, $y = -30$ cm 時, 土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 16. The pressure distribution in soil at $d_0=45$ cm, $y = -30$ cm.

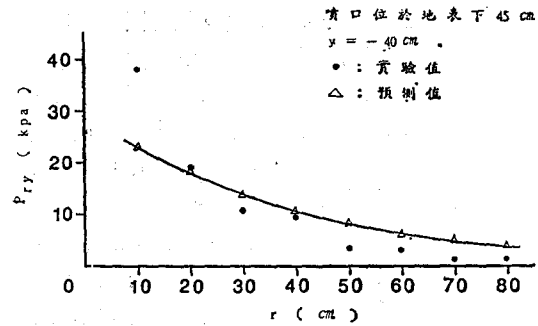


圖17. 噴口位於地表下45cm, $y = -40$ cm 時, 土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 17. The pressure distribution in soil at $d_0=45$ cm, $y = -40$ cm.

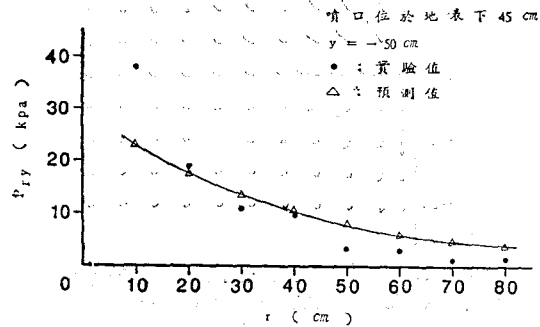


圖18. 噴口位於地表下45cm, $y = -50$ cm 時, 土壤承受之壓力在半徑方向之變化情形

Fig 18. The pressure distribution in soil at $d_0=45$ cm, $y = -50$ cm.

四討論

1. 當噴口位於地表下 25cm 時，綜合圖 9~13， $y = -10, -20, -30$ cm 等之土壤承受壓力之實驗值比理論數學模式之預測值還大， $y = -40, -50$ cm 之實驗值比預測值小甚多，兩者有明顯的差異。此種現象顯示在深度為 30cm 以上的土壤被破壞之程度較預測效果要佳。然而，深度在 40cm 以下時，空氣幾乎很少流入，因此，其土壤被破壞之程度較預測效果要低。造成此種現象之最大原因為土槽底層之土壤被壓實程度較上層為堅硬，底層之孔隙較少，而表層壓實程度較鬆，孔隙較大，故壓縮空氣於地表下 25cm 深度噴出時，其流動方向應是朝表層方向，破壞土壤之有效深度為 30cm 以上。
2. 當噴口位於地表下 45cm 時，綜合圖 14~18， $y = -10, -20, -30, -40$ cm 等之土壤承受壓力之實驗值比理論數學模式之預測值還大， $y = -50$ cm 之實驗值比預測值小甚多，同理顯示壓縮空氣於地表下 45cm 噴出時，破壞土壤之有效深度為 40cm 以上。
3. 由圖 9~18 之實驗結果顯示，壓縮空氣在噴口噴出後，其流動方向為大部分朝地表方向，此種現象亦符合新家憲司之實驗結果（如圖 19 所示）。

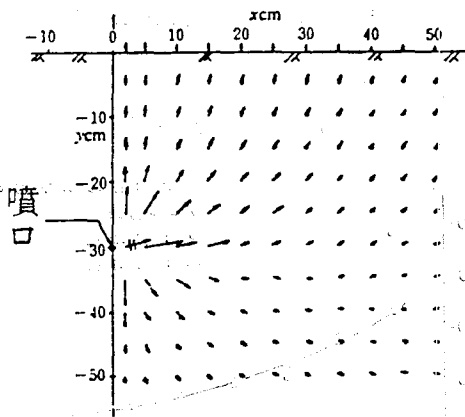


圖 19. 新家憲司之實驗土槽內空氣流動方向
Fig 19. The movement of air in Kenji ARAYA'S Experimental soil bin device.

4. 在圖 10 與圖 17 中 $r = 10$ cm 之實驗值比預測值大甚多，主要的是此兩點之位置在噴口附近（斜上方），因此，壓縮空氣噴出後，往斜上方流動時，此兩點所承受之壓力乃比其他位置大

甚多。

5. 新家憲司之土槽實驗，噴口之壓力為 1830kpa，噴口位置為地表下 30cm，在噴口附近實測之最大壓力為位於 $r = 10$ cm， $y = -30$ cm 之位置，其壓力為 187 kpa，故實際上在土槽噴氣後出口附近之最大壓力與噴口壓力之比值為

$$\frac{p_{ry}}{p_0} = \frac{187 \text{ kpa}}{1830 \text{ kpa}} \div \frac{1}{10.2}$$

本實驗之土槽，噴口之壓力為 $(9.19 \text{ kg/cm}^2) 900 \text{ kpa}$ ，當噴口位於地表下 25cm 時，在 $r = 10$ cm， $y = -20$ cm 之位置，其壓力為 50.8 kpa，故

$$\frac{p_{ry}}{p_0} = \frac{50.8}{900} \div \frac{1}{17.7}$$

當噴口位於地表下 45cm 時，在 $r = 10$ cm， $y = -40$ cm 之位置，其壓力為 37.7kpa，故

$$\frac{p_{ry}}{p_0} = \frac{37.7}{900} \div \frac{1}{23.8}$$

本實驗之 p_{ry}/p_0 值雖然比新家憲司所做實驗之 p_{ry}/p_0 值為小，主要差異之原因為本實驗所用之噴口壓力才 900kpa，而新家憲司所用的噴口壓力達 1,830kpa，而且本實驗所測得之壓力最大位置並非正對噴口之位置，然而新家憲司所測得壓力最大位置剛好是正對噴口的位置，故本實驗所得表 1、表 2 之數據應為合理之結果。

6. 圖 9~18 之實驗結果與理論數學模式之吻合程度有些差異，其影響實驗結果誤差之原因可能為：

- (1) 土壤本身並非均勻之結構。
- (2) 土壤被壓實之程度不易控制在完全均一之情況。
- (3) 壓縮空氣噴出後之流動方向與土壤壓力測定器所感應力量之方向是否垂直，亦會影響實驗結果。
- (4) 土壤所涉及之變數太多，且在整個過程中不易穩定控制所有之變數。
- (5) 測量儀器之精確度無法達到 100% 之精確。

7. 有關壓縮空氣在土壤中之運動情形，歐美缺乏有關之參考文獻，只有日本新家憲司^(21, 27)等人做過一些基本實驗，且尚未發展出一套完整之理論，故本實驗推演之理論模式⁽²⁾，可以供作噴氣深耕後在不同半徑及深度下土壤承受壓力大小之分析。然而⁽²⁾、⁽³⁾兩式，只是針對噴口深度為 25cm 及 45cm 所作的分析，故作

者不建議使用(29)、(30)兩式作各種不同深度噴氣作業時各點所承受壓力之預測，但必要時，可用線性內外插法來作實驗前之估算，以驗證實驗之準確性。

六、結 論

有關噴氣式深耕機實施深耕作業時，土壤承受之壓力分佈情形以及空氣之流動現象，本研究作了噴口位置在地表下 25cm 及 45cm 之基礎實驗，提供了進一步研究之理論依據，由實驗結果可顯示：

1. 使用之深耕機本體其空氣壓力為 10kg/cm^2 (980kpa)，則此壓力在土壤中噴出時，其噴口之壓力為 9.19kg/cm^2 (900kpa)

(1) 當噴口在地表下 25cm 時，可應用

$$\frac{p_{ry}}{p_0} = -9.64 \times 10^{-4} + 9.69 \times 10^{-3} \ln \frac{(y-25)^2 + r^2}{(y+25)^2 + r^2}$$

預測在不同半徑 (r) 及深度 (y) 下，土壤所承受之壓力。

(2) 當噴口在地表下 45cm 時，可應用

$$\frac{p_{ry}}{p_0} = -5.89 \times 10^{-4} + 7.20 \times 10^{-3} \ln \frac{(y-45)^2 + r^2}{(y+45)^2 + r^2}$$

預測在不同半徑與深度下，土壤所承受之壓力。

2. 土槽中之土壤，表層有較多之孔隙，底層較堅硬，此種特性符合一般田間土壤之狀況。壓縮空氣噴入土槽後，空氣之流動情形為大部分朝表層方向流動。

3. 噴口位於地表下 25cm 時，其壓縮空氣 (900kpa) 破壞土壤之有效深度為 30cm。

噴口位於地表下 45cm 時，其壓縮空氣 (900kpa) 破壞土壤之有效深度為 40cm。

4. 新家憲司建立了噴口位於地表下 30cm 之理論資料，本實驗進一步建立了噴口位於地表下 25cm 及 45cm 之理論資料。

七、建 議

爲了建立完整之有關壓縮空氣在土壤內流動及土壤承受壓力大小分佈之理論模式，對今後之研究工作建議如下：

1. 由本實驗之結果，提供了在不同的半徑及深度下，土壤承受壓力大小之資料，破壞土壤之有效深度可由實驗結果之數據予以量化之。但是，破壞土壤之有效半徑，由實驗結果予以量化

上，尚不够精確，因此，建議使用不同之噴口深度 (除了 25cm, 45cm 外) 及噴口壓力 (900kpa 外)，重複土槽內之噴氣實驗，建立更多之資料，使(29)式能更普遍地應用在土壤中之噴氣深耕作業，以準確地預測在任何噴口位置時，土壤中各點所承受壓力之變化情形及其被破壞之有效半徑及深度。

2. 建議在不同的土壤條件下 (本實驗之土壤爲坩質壤土)，重複實驗，以求取各種不同土壤條件下之理論模式，俾作爲應用上之依據。

八、謝 誌

本研究承本系盛中德博士熱心協助，黃陽仁主任、李廣武教授、陳孝祖教授、樂家敏老師及土壤系楊策群主任、王明果教授、土木系李華寧主任等提供寶貴意見，土壤系吳綸先生幫忙做土壤之機械分析，翁郁凱先生、蕭世傑、陳家輝同學之幫忙實驗及資料整理，始克順利完成，謹於此並申最高謝忱。

九、符 號 說 明

A: 截面積

a: 常數

b: 常數

C: 常數, $C = \frac{kRT}{m}$

C_s : 土壤中之常數，一般爲 100°

d: 毛細管徑

d_0 : 噴口位於表下之深度

f: 摩擦係數

F: 作用力

g: 重力加速度, 980cm/sec^2

G: 重量流率

H: 噴口位於土壤表面上之距離

k: 空氣穿透毛細管之穿透率

K: 透水係數

l: 毛細管長度

m: 摩爾重

M: 質量

M^* : March number

n: 物質之等壓比熱與等容比熱之比值，

$n = C_p/C_v$, 空氣之 $n = 1.4$

n^* : 氣體摩爾數

P_1 : 空氣在毛細管入口之絕對壓力

p_2 : 空氣在毛細管出口之絕對壓力
 p_0 : 噴口位置之錶壓力
 p : 土壤中空氣之壓力
 P : 壓縮空氣之壓力
 P_t : 靜滯狀態之壓力
 q_v : 土壤中空氣之體積流率
 q_m : 土壤中空氣之質量流率
 r : 土壤距噴口之半徑
 r_0 : 噴口之半徑
 R : 氣體常數/mole
 R_r : 無因次半徑, $R_r = r/R_s$, $R_s = 0.1696H$
 Ren : 噴口位置之雷諾數
 Res : 土槽內各點之雷諾數
 s : 飽和度
 S_v : 含有水分之土壤粒子之比表面積
 t : 時間
 T : 絕對溫度
 u : x 方向流速
 U^* : x 方向無因次流速
 v : y 方向流速
 v^* : y 方向無因次流速
 v_a : 空氣流速
 v_a^* : 含有土壤顆粒之毛細管內空氣流速
 V_t : 全容積 (含土壤顆粒、水分、空氣等)
 V_c : 水分與空氣所占容積
 V_w : 水分所占容積
 V : 空氣之體積
 w : z 方向流速
 Z : 無因次距離, $Z = \frac{z}{R_s}$
 ω^* : Vorticity, 渦度
 ρ : 土壤中空氣之密度
 μ : 粘度
 ϕ : 沿噴口中心之速度分佈函數
 ϵ : 孔隙率
 ϵ_a : 空氣率
 γ : 空氣之比重量
 α : 位置常數
 β : 亂流係數

十、參考文獻

1. 陳振鐸, 1982. 基本土壤學, 徐氏基金會。
2. 陳振鐸, 1971. 土壤物理學, 正中書局。
3. 郭魁士, 1985. 土壤學, 中國書局。
4. 彭錦樵、黃陽仁, 1982. 噴氣式管理機械之田間試驗研究, 中國農業工程學報, 第28卷第4期。
5. 彭錦樵、樂家敏, [1983. 噴氣深耕對葡萄生長特性之影響, 中國農業工程學報, 第29卷第2期。
6. 彭錦樵, 1983. 噴氣式深耕機最佳作業條件之研究, 中國農業工程學報, 第29卷第4期。
7. 彭錦樵、樂家敏、王豐政, 1985. 多用途噴氣式深耕機之改良及試驗, 中國農業工程學報, 第31卷第1期。
8. 彭錦樵、樂家敏, 1986. 自走式深層鬆土施肥(藥)機之田間試驗研究(1)茶園之地下施肥試驗, 中國農業工程學報, 第32卷第1期。
9. 木谷收, 1975. ニューマチック耕うんのための基礎的研究, 三重大學農學部學術報告, 第48號。
10. 坂井純, 1983. ロータリ耕うん用なた刃の片刃と兩刃の耕うん特性に関する研究(第1報), 農業機械學會誌, Vol. 45. No. 1.
11. 李基明、木谷收、岡本嗣男、三浦恭志郎、森本國夫等, 1982. 振動耕うんの自動制御に関する基礎研究, (第1報)——振動耕, うんにおけるけん引抵抗減少機構——農業機械學會誌, Vol. 44. No. 2.
12. 李基明等, 1982. 振動耕うんの自動制御に関する基礎研究, (第2報)——土の變形, 內部應力および破壞特性について——農業機械學會誌, Vol. 44. No. 3.
13. 李基明等, 1983. (第3報)——振動耕うんの計算機制御——農業機械學會誌, Vol. 44. No. 4.
14. 岩崎一男, 1981. 作物栽培と土壤空氣, 岩谷産業株式會社。
15. 淺澤榮、川村登, 1984. 深耕用アップカッターロータリ耕うんづめの研究, (第1報)——耕うんづめの試作と土塊の後方投てき——農業機械學會誌, Vol. 46. No. 3.
16. 淺澤榮、川村登, 1985. (第2報)——模型實驗(1)土塊の後方投てき特性——農業機械學會誌, Vol. 46. No. 4.
17. 淺澤榮、川村登, 1985. (第3報)——模型實驗(2)試作づめの耕うん抵抗特性——農業機械學會誌, Vol. 47. No. 1.
18. 酒井憲司、寺尾日出男、松居勝広, 1983. 振動式サブソイラにおける土壤の振動切削に関する研究, (第1報)——最適振動方向について——農業機械學會誌, Vol. 45. No. 1.
19. 酒井憲司等, 1985. (第2報)——けん引抵抗低減に對する振幅と振動數の影響度——農業機械學會誌, Vol. 47. No. 1.

20. 島根縣農業試験場, 1978. 農業試験場研究成果発表會, 發表要旨集。
21. 新家憲司, 1978. 土壤の流體抵抗——氣體を流した場合——農業機械學會誌北海道支部報, 第19號。
22. 新家憲司, 1980. 土壤層に流體を壓送したとき發生する壓力, (第1報)——水分を含む土壤に氣體を流した場合——農業機械學會誌, Vol. 41. No. 4.
23. 新家憲司, 1980. (第2報)——土壤の物理的因子と發生壓力の關係——農業機械學會誌, Vol. 42. No. 3.
24. 新家憲司、川西幸四郎, 1981. (第3報)——流體によって土を破壊することによるサブソイラのけん引抵抗力の低減——農業機械學會誌, Vol. 43. No. 1.
25. 新家憲司、川西幸四郎、高銳, 1982. (第4報)——空氣溶解水を噴出することによるサブソイラのけん引抵抗力の低減——農業機械學會誌, Vol. 44. No. 2.
26. 新家憲司等三人, 1983. 流體壓送による土壤層の破壊(第1報)——流體壓送するサブソイラの設計——農業機械學會誌, Vol. 45. No. 1.
27. 新家憲司, 1985. (第2報)——含水比の違いによる土壤破壊の違い——農業機械學會誌, Vol. 46. No. 4.
28. 農業生産工學研究會, 1981. 壓縮空氣の注入による土層改良および作物の生育效果に關する試験成績概要
——1.果樹園に對する效果。
——2.野菜園に對する效果。
29. Albert C. Trowse, 1983. Observations on Under-the-row Subsoiling After Conventional Tillage, Soil and Tillage Research. Vol. 3. No. 1.
30. B. K. Huang, 1973. Design and Analysis of a Fluid Injection Spot and Furrow Opener. Transaction of A.S.A.E.
31. Braja, M. Das, 1983. Advanced Soil Mechanics. 歐亞書局
32. Daniel Hillel, 1982. Introduction to Soil Physics. 大學圖書公司
33. Daugherty, Robert L, 1980. Fluid Mechanics with Engineering Application. 東南書局
34. Elie Carafoli, 1968. High-Speed Aerodynamics. 大學圖書公司
35. Guy D. Smith, 1984. Fundamentals of Soil Science. 虹橋書局
36. H. Kuipers, 1984. The Challenge of Soil Cultivations and Soil Water Problems, Journal of Agricultural Engineering Research (J.A.E.R.) Vol. 29. No. 3.
37. H. W. Chandler, 1984. The Use of Non-linear Fracture Mechanics to Study the Fracture Properties of Soil. J.A.E.R. Vol. 29. No. 4.
38. J. V. Stafford, 1977. The Performance of a Rigid Tine in Relation to Soil Properties and Speed. J.A.E.R. Vol. 24.
39. J. V. Stafford, 1981. An Application of Critical State Soil Mechanics —— The Performance of Rigid Tines—— J.A.E.R. Vol. 26. No. 5.
40. J.V. Stafford, 1984. Force Prediction Models for Brittle and Flow Failure of Soil by Draught Tillage Tools. J.A.E.R. Vol. 29. No. 1.
41. Katsuhiko Ogata, 1978. System Dynamics. 淡江書局
42. M. J. Butson; D. MacIntyre, 1981. Vibratory Soil Cutting.
——I. Soil Tank Studies of Draught and Power Requirements.
——II. An Improved Mathematical Model. J.A.E.R. Vol. 26. No. 5.
43. M. J. Goss, etc. 1984. Effects of Soil Management Practice on Soil Physical Conditions Affecting Root Growth. J.A.E.R. Vol. 30. No. 2.
44. R.J. Godwin, 1977. Soil Failure with Narrow Tines. J.A.E.R. Vol. 22.
45. Robert D. Zucker, 1977, Fundamentals of Gas Dynamics. 美亞圖書公司
46. Thomas M. Little; F. Jackson Hills, 1978, Statistical Methods in Agricultural Research. 歐亞書局
47. T. William Lambe; Robert V. Whitman, 1979. Soil Mechanics (SI Version). John Wiley & Sons Co.