

農業機械於水田行走性能之研究(一)

土質力學在農機田間作業之意義中興一型土壤 力學係數測定器之研製及其在稻作田間之測定

黃 陽 仁

Studies on Trafficability and Performance of Farm
Machinery on the Soff Paddy Field (I)

Significance of Soil Mechanics on Farm Machinery
Field Operation, Measure Device of the Soil
Mechanics Parameters, Type CH-1 and Its
Measurements on Rice-Paddy Field.

Yang-ren Hwang

一、緒 言

時值當前政府極力重視推行農業機械化政策之際，自國外引進農機，欲在本省之水稻田間內使用時，事前之考慮所將遭遇之一大困難，為田間地面表土軟弱之程度，所引起之機械行走性能（Trafficability）低惡之問題。農業機械行走裝置，為履帶式或車輪式，其接地壓力（Contact pressure）之大小，可直接由機體重量及接地面積求得，惟田間土壤之軟弱程度，因土壤種類，含水量，田間之灌排水管理狀態、氣象變化以及作物之種類（蒸發量、根群分佈等）等因子之變化，各地區皆為不相同。故第一步，謀求土壤承载力（Bearing capacity）之測定方法，為預先防止機體沈陷軟泥田間之有效手段。又農業機械之動力大小，雖源由於搭載引擎之大小，直接影響牽引馬力（Drawbar horsepower），但其行走於田間作業時，土壤軟弱之程度，却能左右曳引機等農機之牽引性能，有時大馬力之機械竟不如較小馬力者，非但不能發揮其馬力，反受其大馬力之害，故第二步，謀求土壤抗剪力（Shearing force）之測定方法，為預先防止機體行走裝置滑動不能前進之又一項重要手段。

本研究有鑑於本省從事農機工作者，一般尚缺乏此項認識，亦無從測定土壤之力學性質，乃研製用以預測農業機械行走性能之測定器一種，名之為中興一型土壤力學係數測定器（Measure device of the Soil Mechanics parameters, type CH-1），以為解決此項問題之一項利器。進而為今後本省稻作生產作業之採用適當之農業機械計，於五十九年二月至六月間，假中興大學實習農場，測定獲得稻作整地插秧，以至於生育而完熟之田間土壤力學性質，本文乃此項測定器之研製及測定結果之報告。

二、土壤之承載能力及沉陷，在土質力學上理論之探討：

(Discussions of Bearing Capacity and Sinking of Soil in Soil Mechanics.)

農業機械行走軟弱之田間，考慮土壤之支持能力及沈陷之問題，若以一般土質力學上之理論來解釋，可獲得初步之推測及答案。使地面不致發生顯著之沈陷現象 (Sinking)，所能承受之最大載荷重 (Bearing Load) 可由 Terzaghi, Prandtl, Housel 等氏之限界承載能力式計算之，其中 Terzaghi⁽¹⁾ 對堅實土壤地面之最大承載能力，係以次式表示：

$$W_b = bc N_c + bq N_q + \frac{1}{2} \gamma b^2 N_\gamma \dots\dots\dots (1)$$

式中 b 為矩形載荷面 (Bearing area) 之短邊長度， c 為土壤之粘着係數， q 為矩形載荷面兩側之超載 (Surcharge)， γ 為土壤之密度， N_c ， N_q ， N_γ 為 Terzaghi 支持能力常數，由土壤內摩擦角求出，如圖 1 所示。

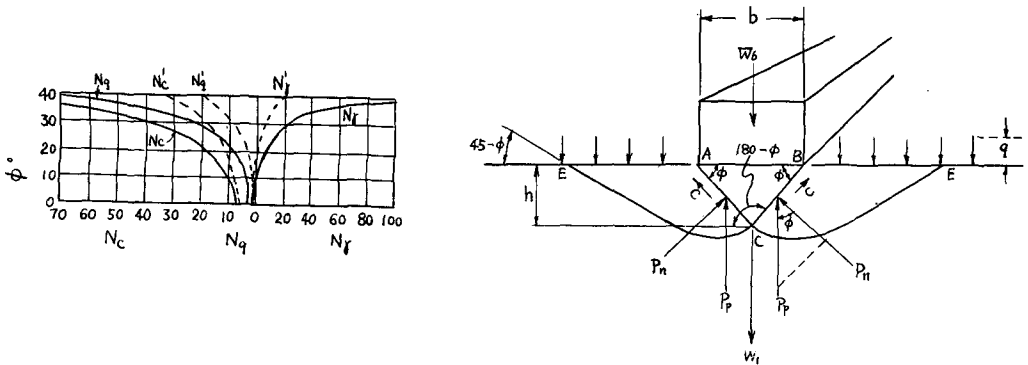


圖 1 Terzaghi 之地盤支持破損
Fig. 1 Bearing capacity by Terzaghi.

載荷重若大於 W_b 時，則構成所謂 General Shear failure 而沈陷。若地面為澎鬆之土壤，其支持能力受發生 Local Shear failure 之拘束，而由下式表示：

$$W'_b = \frac{2}{3} bc N'_c + bq N'_q + \frac{1}{2} \gamma b^2 N'_\gamma \dots\dots\dots (2)$$

而 N'_c ， N'_q ， N'_γ 為小於 N_c ， N_q ， N_γ 之常數，如圖 1 所示。

上面之公式在設計一般建築、水利土木工程、公路鐵路之道路工程時，因需在地層之支持能力範圍內作業，且沈陷量 (Sinkage) 在長年之歲月中，變化有限之情形下存在，而有其理論之價值。

惟農作業之田間土壤，常受天候及栽培作物之影響，故土壤表面之承載能力一般甚低，一般之機械不可能於沈陷量為有限之狀態下作業。故 Terzaghi 之承載能力之方程式，不能實際預知農作業之機械承載能力及沈陷問題。

首先將載荷壓力 P 與沈陷量 z ，以方程式表示者為 Goriatchkin⁽²⁾ 等學者，彼等之方程式成為當今各國學者，以實驗方法求證之焦點。即

$$p = k z^n \dots\dots\dots (3)$$

式中 k 為由載荷板之種類而定之係數， n 為依土壤之狀態而定之常數 ($0 < n < 1$)。

其後 Bekker 將上式之常數 k ，以 $(\frac{kc}{b} + k\phi)$ 表示， b 為載荷板之寬度， $kc, k\phi$ 稱為土壤之變形係數即⁽³⁾

$$p = (\frac{kc}{b} + k\phi) z^n \dots\dots\dots (4)$$

但上式經多方學者之實驗證明，⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 知頗多欠妥之處。旋有由 Reece 所提出之載荷——沈陷量之關係式⁽⁴⁾即

$$p = (c kc' + \frac{1}{2} b k\phi') (\frac{z}{b})^n \dots\dots\dots (5)$$

式中 $kc', k\phi'$ ，為各種土壤常數，由 Willis 之實驗⁽⁶⁾，知與實際測定之曲線甚接近。

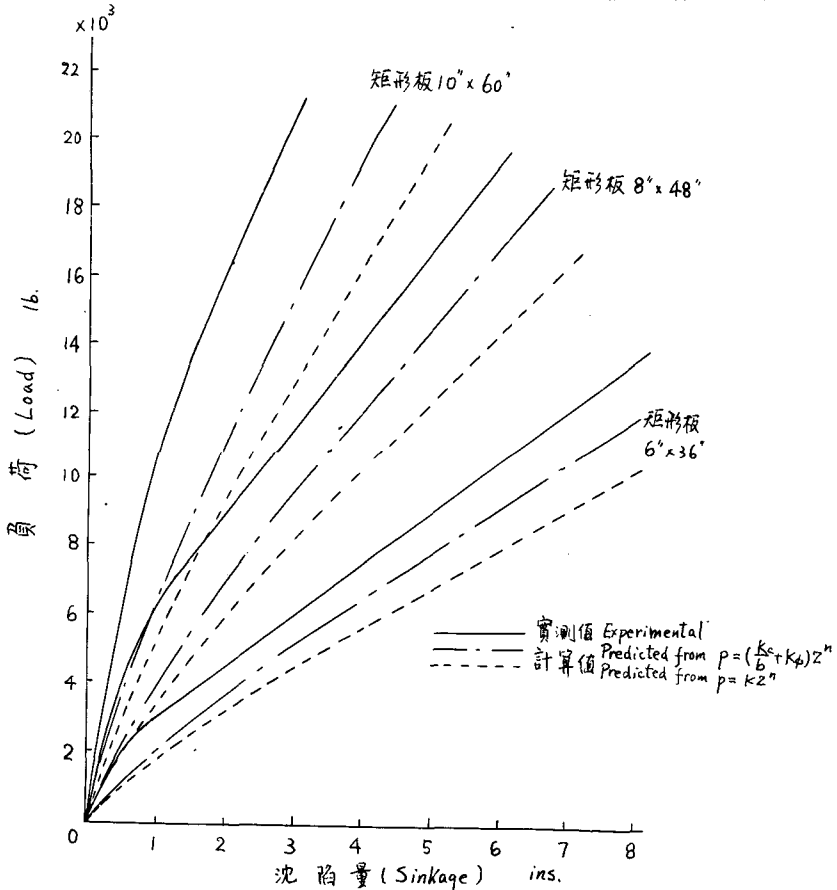


圖 2 砂土上負荷—沈陷量關係曲線實測值及計算值之比較
 Fig.2 Predicted and experimental load sinkage curves for sand. (By wills)

比較砂土及粘土之載荷——沈陷量曲線，知兩者對負荷之支持能力不同。砂土接近彈性之應力——應變關係，其變形量為載荷重之函數，但粘土者，接近塑性舉動，在載荷下，於土壤內部產生應力緩和 (Creep) 現象，變形量為時間之函數。故在粘性土壤之載荷——沈陷量曲線，視時間之長短而有不同。砂土中之發生沈陷，乃流動變形下之結果，而粘土中之發生沈陷，乃塑性變形之結果，但一般之土壤為具有粘彈性舉動 (Plastoelastic behavior) 之物體，其力學解析迄欠明瞭。

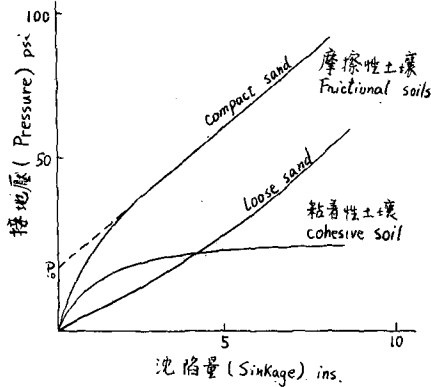


圖3 典型之接地壓—沈陷量關係曲線

Fig. 3 Typical pressure sinkage curve

矩形板於其沈陷之際，一般於其板下形成一三角形之土楔，與矩形板一併沈陷，土楔之角度為 $90^\circ - \phi$ ， ϕ 為土壤之摩擦角。沈陷量增加時，各深度下之土壤承載能力，Meyerhof 求得如下式：

$$p = p' + p'' \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{但 } p' = c \left(\cot \phi \left\{ \frac{(1 + \sin \phi) e^{2\theta \tan \phi} - 1}{1 - \sin \phi \sin (2\eta + \phi)} \right\} \right)$$

$$+ p_0 \left(\frac{(1 + \sin \phi) e^{2\theta \tan \phi}}{1 - \sin \phi \sin (2\eta + \phi)} \right)$$

$$p'' = \frac{\gamma b}{2} \left\{ \frac{4p_0'' \sin (45 + \frac{\phi}{2})}{\gamma b^2} - \frac{1}{2} \tan (45 + \frac{\phi}{2}) \right\}$$

(6)式亦可簡化為 $p = c N_{cq} + \frac{\gamma b}{2} N_{\gamma q}$ ， N_{cq} ， $N_{\gamma q}$ 為係數。

三、土壤抗剪力之理論探討

(Discussions of Soil Shearing Force)

如圖5所示，將負有荷重之平板 (Plate) 平置於土壤面，然後欲作水平方向之移動時，平板與接觸平板之土壤，平板下方之上層土壤與下層土壤，將發生相對之變形，此種變形為使平板移動時產生阻力 R 之原因。平板由靜止而水平移動，此水平向之滑動量愈小，則阻力愈小，滑動量 j 對平板之長 l 之百分率，即滑動率 (Slip)，由下式表示：

$$S\% = \frac{j}{l} \times 100 \dots \dots \dots (7)$$

平板與接觸平板處土壤之間之最大阻力 τ'_{max} 由下式表示：

$$\tau'_{max} = c + p \tan \phi \dots \dots \dots (8)$$

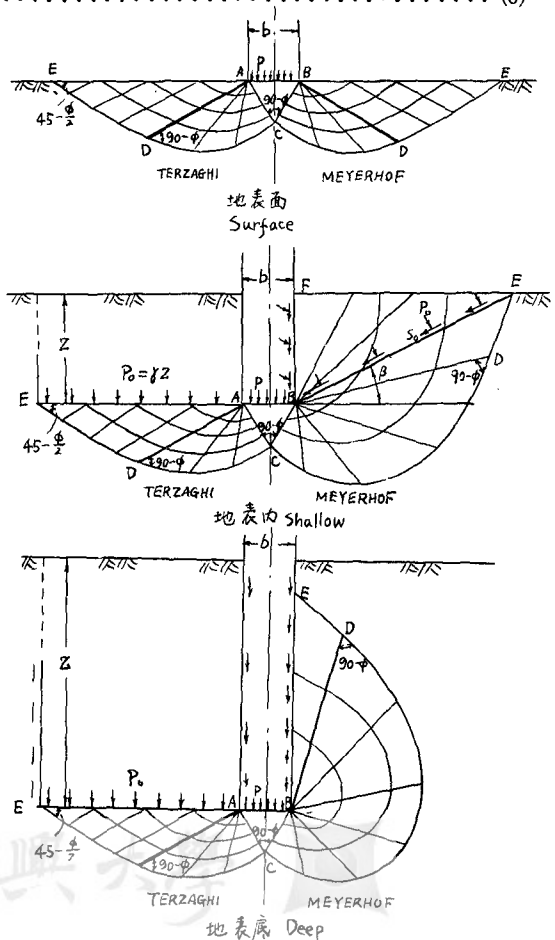


圖4 基礎下之塑性潰損

Fig. 4 Plastic failure beneath foundations.

式中 c' 為平板與土壤間之粘着係數 (Adhesion), $\tan \phi'$ 為平板與土壤間之摩擦係數, p 為接地壓 (Contact pressure)。又平板下方土壤與土壤之間之最大剪力 τ_{max} 由下式表示:

$$\tau_{max} = c + p \tan \phi \dots\dots\dots (9)$$

式中 c 為土壤之粘着係數 (Cohesion), $\tan \phi$ 為土壤之內摩擦係數。

據 Neal⁽⁸⁾ 之研究, 指出橡皮與土壤之間之 c' 與 $\tan \phi'$, 均小於 c 與 $\tan \phi$ 之值, 故知一般材料之平板與土壤滑動時, 因 $\tau_{max} < \tau_{max}$, 故移動量漸增, 首先由平板與土壤接觸處剝離, 而土壤內部呈粘彈性變形, 於砂質土壤可看出明顯之滑線 (Slip line)。

今將一長豎板 (Blade), 如圖 6 所示, 使之作水平方向之移動時, 豎板前側之土壤, 由推實變形而終於產生塑性流動 (Plastic flow), 將呈現 Rankine 狀態應力之土塊 A B C 往上擁起, 而土塊 A D B 之部分, 稱之為 Radial-Shear zone, 隨豎板一併作水平之移動, 相當於平板沈陷時之土楔, D B 弧面之曲度, 由豎板與土壤間之摩擦係數而定。

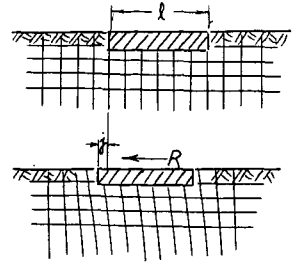


圖 5 平板之水平移動量
Fig. 5 Horizontal displacement of plate.

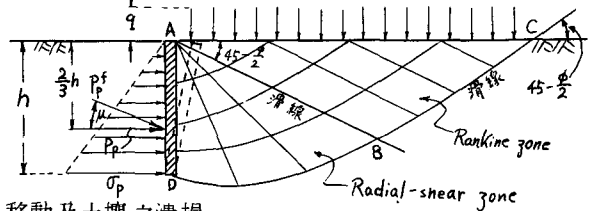


圖 6 豎板之移動及土壤之潰損
Fig. 6 Blade movement and soil failure

欲使豎板保持水平移動之條件, 為有一合力 P_p' , 與 P_p 呈 μ 之夾角摩擦角, 而其作用點為豎板高之 $\frac{1}{3}$, P_p 之值, 可由被動土壓下主應力之變化求之, Terzaghi 將 P_p 之值求之表示如下:

$$P_p = \int_0^h \sigma_p dz = \int_0^h (q N\phi + 2c\sqrt{N\phi} + \gamma z N\phi) dz$$

$$P_p = qh N\phi + 2ch\sqrt{N\phi} + \frac{1}{2} \gamma h^2 N\phi \dots\dots\dots (10)$$

式中 $N\phi = \tan^2 (45 + \frac{\phi}{2})$, 亦稱之為 Rankine 之被動土壓係數 (Coefficient of passive earth pressure)。惟豎板之前進, 既然使土塊 A B C 及土塊 A D B, 與土壤母體分離, 即由滑線 (Slip line) D B C 形成一剪斷面, 故計算滑線 D B C 之抗剪合力, 亦應能求出豎板之推力。

$\angle ACB$ 呈 $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ 之角度, 故土壤為愈砂質者, 弧 D B C 愈長, 反之, 土壤之 ϕ 值低, 呈粘性土壤者, 滑線 (Slip line) D B C 較短, 此在獲得土壤之推力 (Thrust), 以用在農機之行走裝置之改良上, 有探討之價值。Bekker 根據上述之理論, 用於特殊裝甲車之履帶之改良上⁽⁹⁾, 而頗受重視。但實際上, 豎板之長度為有限者, 故滑線為三元之曲面, 可稱之為滑面 (Slip surface), Payne 曾作其近似之力學解析⁽¹⁰⁾。

惟上述用於改良行走裝置之理論, 受行走裝置行進中滑動率 (Slip) 之限制, 即滑動率達某一數值時, 因前後凸起物所造成滑動線之一部分重合, 而減少發生有效之抗剪力, 又此項理論僅適用於均齊性 (Homogeneity) 之土壤, 而一般田間之地層 (Terrain) 為非均齊性 (Non-homogeneity) 者。故使用 (8) 式欲求出土壤能發生之推力, 而測定土壤之係數, 未必能吻合實際上, 機械於該田間之行走特性。

於圖 5 所示之平板作水平滑動時, 將同時發生平板之沉陷, 此種沉陷量稱之為滑動沉陷 (Slip

sinkage)。此為使動態之機械比靜態之機械，造成較大沉陷量之原因。

四、田間土壤承載能力及抗剪力在農業機械行走性上之意義：(Significance of Bearing Capacity and Shearing Force of Field on Farm Machinery Trafficability)

農業機械行走性問題之發生，在於土壤之過於軟弱，此與土質力學上之問題相同，但土木工程學上計算地盤之支持能力，係考慮在靜態而長時間之土壤應力作用下，所將發生之結果，而農業機械之行走於田間，却為動態而短時間者，故不宜以土質力學上之理論以求出垂直及水平方向之安全負荷。安全負荷直接為機械重量及牽引力之函數，以目前材料強度及動力源言，尙未能製造合於前述安全負荷範圍內車體重量之農機，而牽引力之需求，却有增無減。實際上，農機行走裝置，可於土壤一再接受踏實流動壓潰之重複發生之土壤應力之變化下，獲得浮動力 (Flotation) 及推力 (Thrust) 以達成作業之需要。田間土壤呈非均齊性，一般於表面具有草類植生者，該層之沈陷強度及抗剪強度較大，可有效利用以發生行進力。於軟弱泥濘之田間，則可利用土壤底盤處堅硬之底土，以資改善其行走性。

土壤承載能力在農機行走性之問題，不在於其沈陷深度所導致之問題，而真正之關鍵為如何測定一未知田間之有效推力發生之深度位置。一旦吾人獲知此項資料，即可計算農業機械所需之地上間隙 (Ground clearance)，以為設計行走裝置尺寸及結構之根據。於實際作業行走時，需迅速使抓土 (Grip) 裝置伸達堅實之該土壤層。當然此地上間隙之量，應視總沈陷量，即靜態沈陷及滑動沈陷之和而定。故設計水田用車輪時，首先需測定該地區田間，足以發生有效推力之深度。然後根據此項資料，設計製造合乎該地區田間需要之車輪，其上之凸起物，對軟弱之表土應具貫穿性 (Penetration)，而對堅實之底土，應具抗陷性 (Anti-sinking) 進而於該底土內獲得其前進力 (Propulsion)。為達成此項目的，一般之輪胎不具備以上之條件，而勢必製成中空之鐵輪，而鐵輪凸起物之形狀角度及大小，皆需考究實際之情況，始能合乎要求。總之，土壤之支持力及抗剪力為土壤力學性質一項之兩面，須彼此相並考慮始可。而其相關之學問，今後有待從彈塑性力學之立場，圖謀進一步之理論探討及實驗之證明。

五、土壤力學係數測定器之構造及使用：

(Measure Device of the Soil Mechanics Parameters, Type CH-1)

根據前述土壤承載能力，沈陷及抗剪強度之現有理論，參照目前農業機械在水田作業時行走之舉動，吾人認為可利用相似律 (Similarity)，以一種測定器，迅速了解田間各深度位置之承載能力及抗剪強度，以為判斷農業機械在該田間行走作業可能性之標準，但因測定器與土壤作用之舉動未必能與機械行走裝置者相同，故有待作多次多地區之測定，以求出其換算修正值。

針對表 1 所示之影響農業機械行走作業性能之田間土壤諸因子，本測定將用以測定相關之土壤

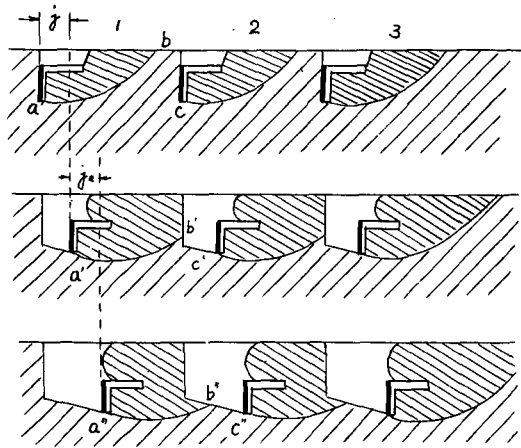


圖 7 中隔式履帶之滑動及滑動沈陷
Fig. 7 Slip and slip-sinkage of a spaced link track.

本測定器之構造，如圖所示：

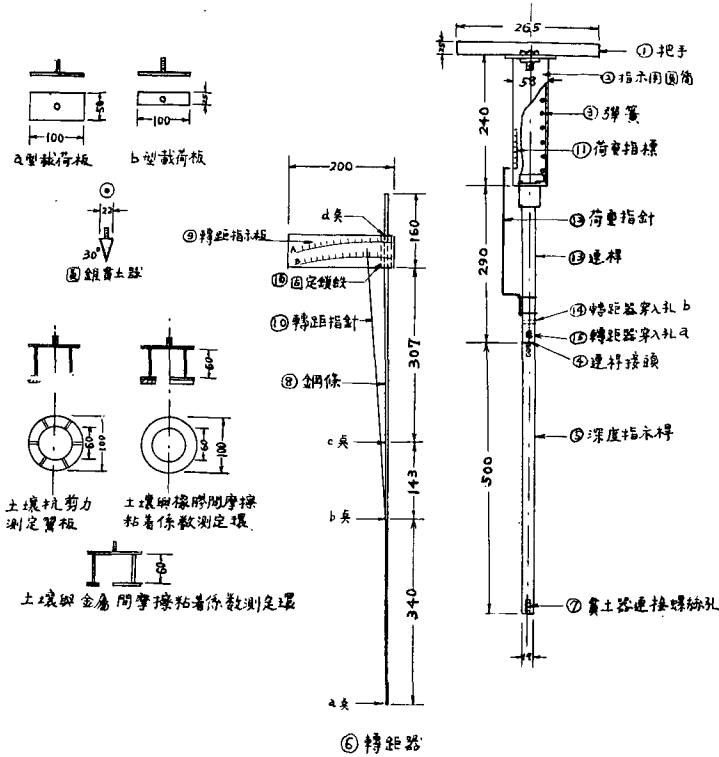


圖 8 中興一型土壤力學係數測定器之構造
 Fig. 8 Structure of Measure Device of the Soil Mechanics Parameters, Type CH-1

(1)為把手 (Handle)、(2)為荷重指示用圓筒 (Load indicator)、(3)為壓縮彈簧 (Compression spring)、(4)為連桿接頭 (Coupling of connecting rod)、(5)為貫穿深度指示桿 (Penetrating depth indicator)、(6)為轉矩器 (Torque wrench) 穿入孔、(7)為貫土器連接螺絲孔 (Penetrator connecting hole)、(8)為轉矩器之鋼條 (Steel rod)、(9)為轉矩指示板 (Torque indicator)、(10)為轉矩之指針。轉矩器之鋼條 (Steel rod) 之斷面為矩形，一端較細而向另一端逐漸加粗，即愈接近 a 端，其斷面較細，反之愈接近 d 端則愈粗。轉矩指示板 (Torque indicator)，其上有二種刻度：A 刻度之敏感度 (Sensitivity) 高，適於軟弱之土壤測定用，係將鋼條 a 端插入連桿之轉矩器穿入孔 a，並使指示板滑動，固定於鋼條上 c 點時測定之用；又 B 刻度之敏感度較低，適於較有“硬度”之軟土測定之用，係將鋼條插入轉矩器穿入孔 b，使鋼條上 b 點止於 b 孔固定，並使指示板滑動固定於鋼條上 d 點時測定之用。轉矩由指針指示之。貫土器包括：(1) a 型載荷板 (Footing-a)，尺寸為 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。(2) b 型載荷板 (Footing-b)，尺寸為 $100\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 。(1)、(2)以 4 mm 之不銹鐵板製成，其中中央以螺絲焊接。(3)圓錐 (Cone) 貫土器，圓錐底面積為 380 mm^2 ，圓錐角為 30° ，屬黃銅質。(4)土壤抗剪力測定翼板 (Shearing vane) 係將 $20\text{ mm} \times 11\text{ mm}$ 之翼片六片，平均 60° 之間隔半徑方向直立焊接於內徑 60 mm ，外徑 100 mm 之環板 (ring) 上而成。(5)土壤與金屬 (鐵板) 間，摩擦粘着係數測定環。(6)土壤與橡膠間摩擦粘着係數測定環。(5)與(6)除缺乏翼片外，其他尺寸與(4)者相同，為使其中心連接指示桿計，於環板上

另焊以支柱與圓板連接，於圓板中央焊以螺栓。上述之(1)、(2)、(3)係用以測定土壤承載能力，(4)為測定土壤抗剪力，(5)(6)為測定摩擦粘着係數之用。又壓縮彈簧有三：a—彈簧之使用荷重為0~10 Kg；b—彈簧之使用荷重為0~30Kg；c—彈簧之使用荷重為0~50Kg，但a，b，c彈簧之高度及外徑皆相同，為使荷重指標上直接能讀出貫土器上之荷重計，指標上已校正加以本測定器之重量，即指標值係指示彈簧壓力及測定器重量之和。本測定器除去貫土器外之重量為3.55 Kg，a型載荷板為0.205 Kg，b型載荷板為0.1 Kg，圓錐貫土器0.05 Kg，土壤抗剪力測定翼板0.28Kg，土壤與金屬（鐵板）間摩擦係數測定環0.25 Kg，轉矩器0.52 Kg。

使用本測定器，測定承載能力時，需三人；一人作記錄；一人手壓把手，施以荷重，注視荷重值；另一人則觀測深度指示桿之刻度，每貫入5 cm時，即記錄此刻之荷重，貫土器係連續貫入土中，故可連續測得一處各深度下之貫土阻力。同一田間應重複多次，以a，b載荷板及圓錐貫土器分別測定其貫土阻力。最後分別計算1cm²下之貫土阻力，繪出其曲線。

測定抗剪力及土壤之外摩擦係數，粘着係數時，則需四人，其中三人與前述測定承載能力者相同，於抗剪力測定翼板或摩擦係數測定環壓陷至某一欲測深度時，第四人作水平扭以轉矩器讀取最大轉矩（Torque）。如此於同一田間重複多次測定各位置各深度之最大轉矩值。測得之轉矩，以下式計算最大抗剪力，或摩擦係數，粘着係數。抗剪力測定翼板，係用以預測曳引機等農機下，田間土壤之抗剪強度。

使用抗剪力測定翼板，以預測具有凸起物行走裝置農機之行走性及作業性時，以下式計算其抗剪力。

$$\tau_{max} = \frac{3 M_{max}}{2\pi (r_1^3 - r_2^3)} \dots\dots\dots(11)$$

使用外摩擦粘着係數測定環，以預測表面光滑之行走裝置農機之行走性及作業性時，以下式計算其外抗剪力。

$$\tau'_{max} = \frac{3 M'_{max}}{2\pi (r_1^3 - r_2^3)} \dots\dots\dots(12)$$

由(11)式及(12)式計算求得之值，欲求其摩擦係數 $\tan\phi$ ， $\tan\phi'$ ，及粘着係數 c ， c' 時，可利用庫倫之原理；其法即將各種荷值換算為接地壓（Normal pressure） p ，記於橫座標，而將各接地壓下之 τ_{max} 值， τ'_{max} 值，記於縱座標，將各相關之點，繪成關係曲線，此曲線稱之為 Coulomb 之破壞線，曲線之斜度，即摩擦角 ϕ 或 ϕ' ；曲線與縱座標相交之值，即粘着係數 c 或 c' ，如圖 9 所示。田間土壤為均齊性時，此曲線為一直線，否則一般之非均齊性土壤，此曲線為一曲線。

本測定器之 $r_1 = 5\text{ cm}$ ， $r_2 = 3\text{ cm}$ 故(11)、(12)式變為(11)'、(12)'兩式。

$$\tau_{max} = 4.875 \times 10^{-3} M_{max} \dots\dots\dots(11)'$$

$$\tau'_{max} = 4.875 \times 10^{-3} M'_{max} \dots\dots\dots(12)'$$

六、稻作田間之力學係數之測定結果：

(Measurements of Soil Mechanics Parameters in Padoy-Rice Field)

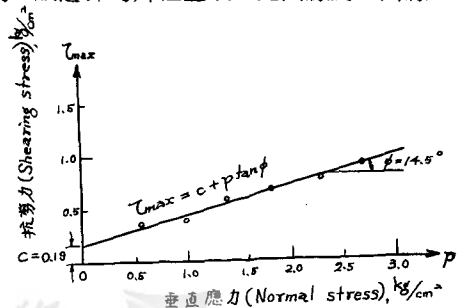


圖 9 摩擦角 ϕ 與粘着係數 c 之求法
Fig. 9 Find ϕ and c From Coulomb's failure line.

以研製之中興一型土壤力學係數測定器，於本（中興大學）校農場稻作田間，作實際測定，期能尋覓研判農機在田間行走及作業之可能性之相關因子。

圖10示使用圓錐貫土器測定稻作田間之貫穿阻力與深度之相關曲線，由圖知整地作業後及插秧作業前之土壤貫穿阻力相似，於10cm深度以內之貫穿阻力皆低，為1.0 Kg/cm²，而15cm以上深度之土壤強度則急劇增加，此與犁耕整地之器具及方法有關，考慮安全係數（Safety Factor）設為3，則欲使用鐵輪作地表下行走（Subsurface crossing）時，其凸起物入土之阻力不能小於0.3Kg/cm²，始可迅速沈陷。又使用插秧機作地表面行走（Surface crossing）時，其鐵輪之接地壓須小於上述之值，始不致沈陷。又比較各期之土壤強度，以稻作生長期間之土壤承載力最弱，此乃因田間之長久浸水所致於15cm深處之承載能力為0.5Kg/cm²，進入收穫期時，因田間排水，故田間土壤表面之承載力增加，於0~20cm深度內之承載能力為直線關係。10cm深度處之承載能力約為2Kg/cm²。

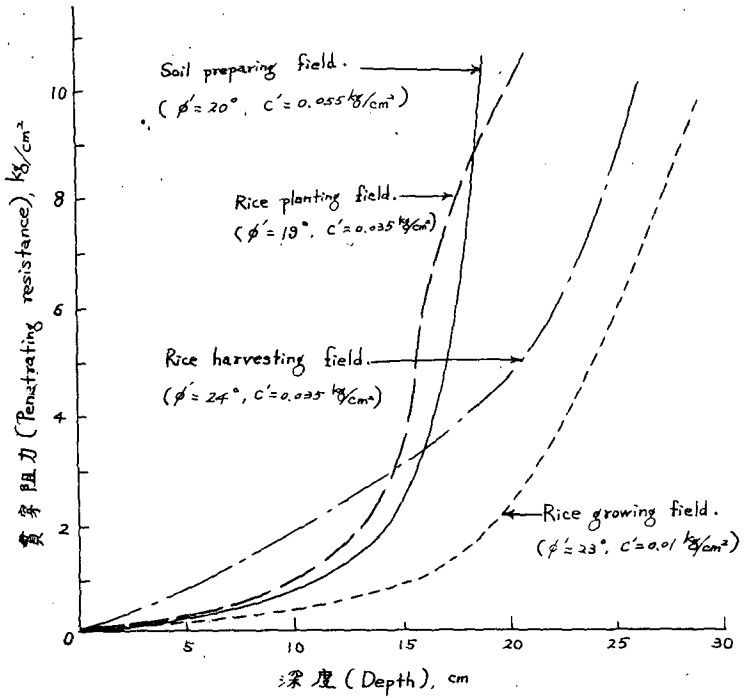


圖10 使用圓錐貫土器測定本校農場稻作田間之貫穿阻力曲線

Fig.10 Cone penetrating resistance of paddy field soil at CHU in Tai-Chung.

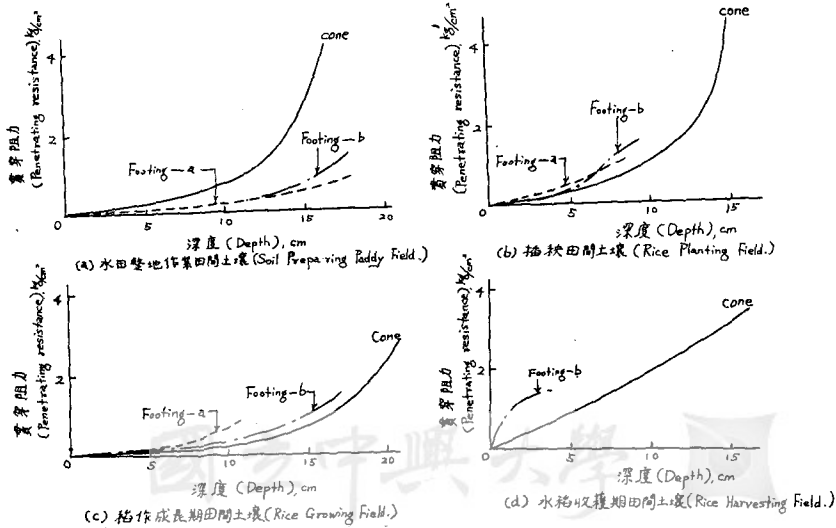


圖11 比較使用圓錐貫土器（底面積3.80cm²）、a型載荷板（底面積50cm²）及b型載荷板（底面積25cm²）於稻作田間之土壤承載力測定曲線。

Fig. 11 Comparison bearing curves among Cone, Footing-a and Footing-b tested in paddy field.

圓錐貫土器之尖端夾角為 30° ，故其測定值為土壤剖面之承載力分佈狀態，而載荷板為土壤受載荷量壓緊，沈陷量與壓力成指數相關之累積承載力，故使用圓錐貫土器後，仍需使用載荷板，以了解農機在田間之浮動性 (Flotation)，圖 11 為比較使用圓錐貫土器及 a 型、b 型載荷板之測定曲線。

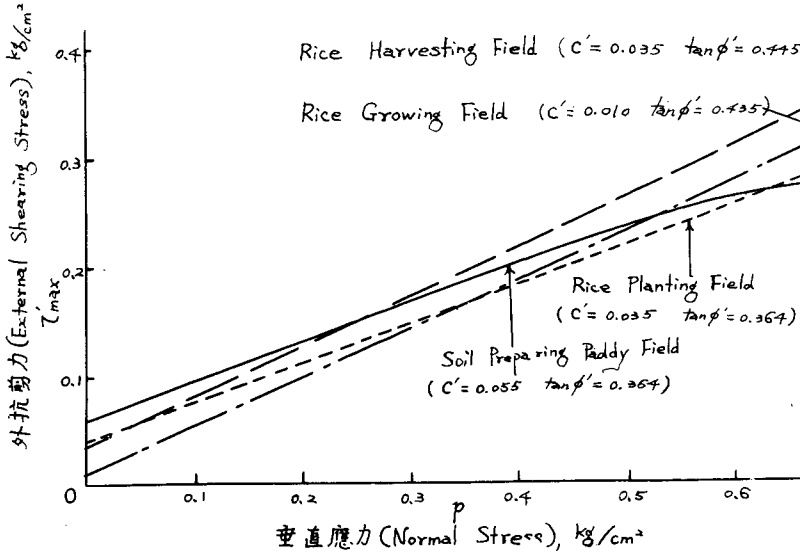


圖 12 稻作田間土壤與金屬之粘着係數與摩擦係數
Fig. 12 Adhesion and coefficient of friction between metal and paddy rice field.

圖 12 為稻作田間土壤與金屬 (鐵板) 間之摩擦係數及粘着係數之測定值，摩擦係數在稻作前後之變化 (水分之變化) 中，無何改變，但粘着係數與土壤之含水量有關。

圖 13 示，稻作田間各深度處 (土壤受載荷影響) 之抗剪強度。由圖知，整地、插秧及水稻成長期中，水田之抗剪強度，殆無差異，此時地表之 τ_{max} 為 0.1 Kg/cm^2 ，沈陷至 10 cm 深度之 τ_{max} 為 0.22 Kg/cm^2 ，其關係曲線至 20 cm 深度處，仍呈直線相關。但收穫之田間土壤抗剪力，因根系之分佈以及田間含水量之大減，抗剪強度在地表為 0.3 Kg/cm^2 ， 10 cm 深度處為 0.35 Kg/cm^2 ， 20 cm 深度處為 0.45 Kg/cm^2 。由此知，作整地，插秧及中耕等作業時，須以地表下行走之方式獲得牽引力，此時以車輪型農機較為有利，但其沈陷

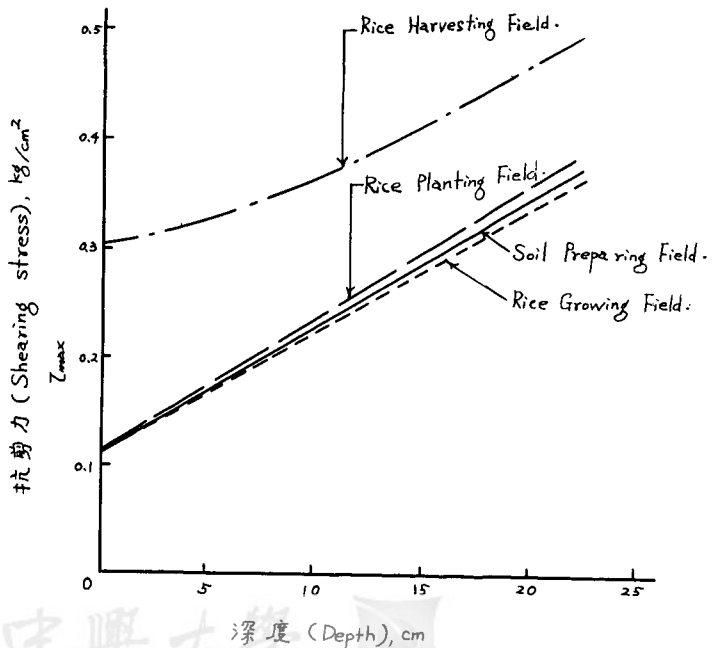


圖 13 稻作田間各深度下之土壤抗剪力
Fig. 13 Shearing stress of paddy rice field at different depth.

深度須在 20 cm 以上。而收穫時期，因田間表土之粘着力大增，使用履帶式收穫機遠較車輪式者，更能獲得土壤之承載力及前進力，其行走之深度不宜過深，以地表面行走為度。

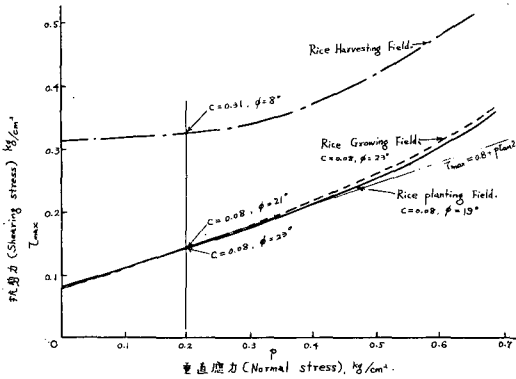


圖 14 稻作田間土壤使用土壤抗剪力測定翼板之庫倫破壞線
 Fig. 14 Coulomb's failure line of paddy-rice field measured by shearing vane.

圖 14 為，使用抗剪力測定翼板，以測定各接地壓下，最大抗剪力 τ_{max} 之關係曲線，由其曲線充分顯示田間土壤之非均齊性 (Non-homogeneity)，插秧期及稻作生長期，田間土壤之庫倫破壞線可以 $\tau_{max} = 0.8 + p \tan 22^\circ$ 表示之。

計算農機接地面積之大小及行走裝置凸起物之形狀尺寸，雖可由本測定器之預測而初步可以獲知，但考慮農機之動態舉動之諸因子，如滑動量及滑動沈陷量，其安全係數之值，究應為何，則有待作多地區多次之試驗，以資決定其結果。

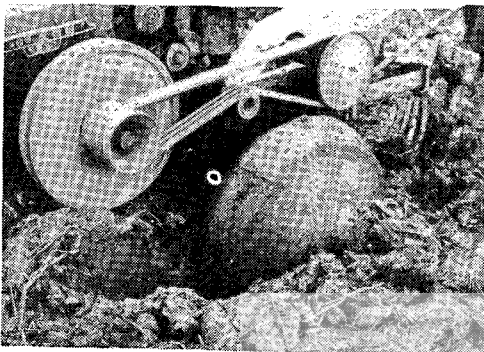


圖 15 軟弱土壤田間犁耕時之行走困難
 Fig. 15 Traveling difficulty of plowing operation in soft field.

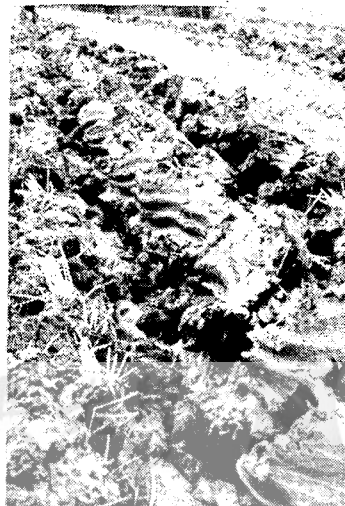


圖 16 重黏土犁耕翻土之困難
 Fig. 16 Soil overturn difficulty in stickiness field.

七、參 考 文 獻 (Literature Cited)

- (1) Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics, 1944.
- (2) Goriatchkin, B. P. (Collective Work). Teoria i proizvodstvo sielskohoziaynih mashin (Theory and Development of Agricultural Machinery), 1936.
- (3) Bekker, M. G. Theory of Land Locomotion, 1956.
- (4) Reece, A. R. Problems of Soil Vehicle Mechanics, U.S.A.T.A.C. Land Locomotion Lab. Report No 97. Warren Mich., 1964.
- (5) Reece, A. R. Principle of Soil Vehicle Mechanics, Proc. Auto. Div. Instr. Mech. Engrs., 1965 - 1966.
- (6) Wilis, B. M. D. The Load Sinkage Equation in Theory and Practice. Technical Report No. 9473. Land Locomotion Lab., 1966.
- (7) 穗波信雄、土屋功位、土—車輛系の力學的體系(第一報), 日本農業機械學會誌。Vol: 30, No 2, (1968)。
- (8) Neal, M. S. Friction and Adhesion Between Soil and Rubber. Agr. Engng. Res., (1966) II-(2).
- (9) Bekker, M. G. Off-The-Road Locomotion, 1960.
- (10) Payne, P. C. J. The Relationship Between The Mechanical Properties of Soil and The Performance of Simple Cultivation Implements. Jour. Agr. Engng Res., 1956.
- (11) 守島正太郎、橋口公一、石黒悦爾: 履帶型車輛の履帶間隔——支持力關係に對する塑性論解析。日本農業機械學會誌。Vol. 30, No 2 (1968)。
- (12) Dept. of the Army, "Soil Traffability", Dept. of the Army Technical Bull., 1959.
- (13) 後藤廉平、平井西夫、花井哲也、レオロジーとその應用, 共立出版社, (1962)。
- (14) 山崎不二夫、土壤物理、養賢堂, (1969)



Studies on Trafficability and Performance of Farm Machinery on the Soff Paddy Field (I)

Significance of Soil Mechanics on Farm Machinery
Field Operation, Measure Device of the Soil
Mechanics Parameters, Type CH-1 and Its
Measurements on Rice-Paddy Field.

Yang-ren Hwang

Summary

The device for measurement of soil values named Measure Device of the Soil Mechanics Parameters, type CH-I, was designed and developed in our laboratory. A wide range of soil conditions, from paddy field to loose land, can be measured and expressed by this device in some soil parameters that is directly concerned to farm machinery trafficability and performance of operation.

The vertical strength of soil is known as bearing capacity which is a criterion whether surface crossing is possible or not. Beyond the bearing capacity of surface soil, sinking would be occurred until the depth where the bearing capacity of subsoil would be enough to bear the load.

In order to understand the soil mechanics structure as well as to look for the depth position of hard bottom, the Cone Penetrator (with cone angle 30° , bottom area 380 mm^2) is used to measure the vertical strength of soil. Two rectangular plates, named Footing-a (with contact area 50 cm^2) and Footing-b (with contact area 25 cm^2), are used for the purpose to predict the trafficability of farm machinery undergoing surface crossing in the field. The horizontal strength of soil, that is important to propulsion and drawbar pull of a farm machinery, could be measured by a Shearing Vane (with six shearing vanes fitted on a round ring). Besides, adhesion and friction between soil and tire (rubber) as well as soil and iron wheel (metal), could be easily found from the external shearing stress—normal stress curves by using a Rubber Ring and a Metal Ring.

So far as trafficability and tractive performance of farm machinery being the serious problems in paddy rice field, the soil mechanics parameters of paddy rice field was measured by the device in this study, and the test results are shown from Fig. 10 to Fig. 14.

Generally speaking, it is possible to obtain adequate bearing strength of Soil beyond 15 cm of depth, where the Cone penetrating resistance shows 3 kg/cm^2 except the value of Rice Growing Field. The soil condition of Rice Growing Field present the weakest one of all in paddy field. Well, it is meanful to predict the surface crossing possibility by using

Footing-a or Footing-b, because they show apparent difference of penetrating resistance than Cone under load, as shown in Fig. 11.

The adhesion and friction between soil and iron plate are shown in Fig. 12. No frictional variables could be recognized in rice-growing paddy field, though the adhesion is changeable with moisture content of soil.

The shearing stress of soil is quite a same tendency of value in depth relating curve among Soil Preparing Field, Rice Planting Field, and Rice Growing Field, Because of water drainage in Rice Harvesting Field, the cohesion of surface soil become considerably increase than the others, and this indicates that such machinery of track type combine will be superior than wheel ones in the viewpoint of undergoing surface crossing, as shown in Fig. 14.

On the contrary, wheel type tractor would be more efficiency in Soil Preparing Field, Rice Planting Field, and Rice Growing Field than crawler type of traveling device. Though the necessary contact area and shape of lugs could be calculated approximately from τ_{max} -p curves as shown in Fig. 12 and Fig. 14, the safety factor of design traveling device should be examined and decided by carrying out a lot of experiments in the field along with considering dynamic behavior of farm machinery, such as slippage and slip-sinkage.