

耕盤のある圃場における支持力のすべり線解析(第2報)

— 干渉状態のすべり線場の支持力解析 —

鹿内健志*1・橋口公一*2・久木田徹*2・上野正実*1・亀井雅浩*3

要 旨

圃場機械の走行部の合理的な設計指針を得るため、耕盤のある圃場の車両に対する支持力問題を剛盤上の摩擦性剛完全塑性体への2つの近接する荷重としてモデル化を行い、すべり線法により解析を行った。第1報で2つの荷重下に生じる干渉状態のすべり線場は荷重幅および荷重間隔に応じて5種に分類されることを示した。本報ではそれぞれのすべり線場に基づいて支持力を算定し、荷重幅、耕盤深さおよび荷重間隔による支持力の推移状況を明らかにした。

〔キーワード〕 支持力、すべり線場、剛塑性、平面ひずみ、耕盤

A Slip-Line Analysis for the Bearing Capacity of Farm Land on a Sole Pan (Part 2)

— Bearing Capacity of Interfering Slip-Line Fields —

Takeshi SHIKANAI*1, Koichi HASHIGUCHI*2, Toru KUKITA*2, Masami UENO*1, Masahiro KAMEI*3

Abstract

In order to establish a reasonable designing method for traveling device of agricultural machinery, the bearing capacity of farm land is theoretically analyzed by the slip-line field method. The vehicle on farm land is regarded as two adjacent loads penetrating into rigid-perfectly plastic solid with internal friction on rigid sole pan. The five types of interfering slip-line field under such load condition were proposed for relation to load width and its interval in the preceding paper. In this study the bearing capacity is calculated for each slip-line field. Then, the variation in the bearing capacity is discussed in relation to the load width, the load interval and the depth of sole pan.

〔Keywords〕 bearing capacity, slip-line field, rigid plasticity, plane strain, hard sole pan

I 緒 言

軟弱地盤を走行するトラクタ、コンバイン等の圃場機械に対する地盤の支持力特性の解明はこれらの性能向上に資する重要な課題である。車両の土への加圧形態は、硬い耕盤とその上の軟弱な作土からなる2層構造地盤へ、2つの近接する荷重が作用すると見なし得るため、従来のPrandtl場

- *1 会員、琉球大学農学部 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地 ☎098-895-8771) College of Agriculture, University of the Ryukyus, Nishihara-cho, Okinawa, 903-0213 Japan
- *2 会員、九州大学農学部 (〒812-81 福岡市東区箱崎 ☎092-642-2929) Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka-shi, 812-81 Japan
- *3 会員、九州農業試験場、現在：中国農業試験場 (〒721 福山市西深津町6-12-1 ☎0849-23-4100) Chugoku National Agricultural Experiment Station, 6-12-1, Nishifukatsu, Fukuyama, Hiroshima, 721 Japan

に基づく支持力解をそのまま適用することはできない。

本研究では、第1報において提案した5種の干渉状態のすべり線場に基づいて支持力解析を行い、荷重幅および荷重間隔に対する支持力を明らかにした。これにより、軟弱地盤において浮上性を要求される車両走行部の合理的な設計指針を与え得ると考える。

II 基本仮定

本研究では支持力の解析にあたり以下のような仮定をおく。

- 1) 荷重幅に比べて荷重および地盤の奥行きは十分に大きく、平面ひずみ(2次元)問題として解析し得る。
- 2) 土は弾性変形を伴わず、また、硬・軟化も生じない剛完全塑性体である。
- 3) 最大塑性仕事の原理が成り立つ。
- 4) 土の降伏条件式は次のCoulomb-Mohr則で与えられる。

$$\bar{\sigma} + \bar{\sigma} \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (1)$$

ここに ϕ および c はそれぞれ内部摩擦角および粘着力で、直接せん断試験、三軸圧縮試験および一軸圧縮試験により求められる一定状態の土の定数である。 ϕ は土の土粒子間の摩擦抵抗に起因するせん断抵抗を示し、土に含まれる砂成分に支配される。 c は土粒子間の相互の粘着力で土に含まれている粘土成分に起因する。また、 $\bar{\sigma}$ および $\bar{\tau}$ はそれぞれ平均垂直応力および最大せん断応力である。

- 5) 土と剛体面(耕盤面)および荷重底面は完全粗で固着摩擦(完全粗接触)が作用する。
- 6) 土の物体力(自重)は無視できる。

III すべり線場

トラクタ等の土への加圧形態は2つの近接する荷重とみなし得る。また、一般に圃場は耕盤を有するので、耕盤を完全剛とし、その上に有限厚の摩擦性剛完全塑性体が存在するとしてモデル化する。荷重間隔 L が十分大で、荷重幅 W に比べ土層厚(耕盤深さ) D も十分大である場合には、それぞれの荷重下に独立にPrandtl解が成立する。Prandtl場における荷重幅 W_p 、受動三角域の上辺長 L_p およびすべり線場の最深長 D_p の間には次式

の関係が成立する。

$$W_p = \frac{2 \cos \mu}{\cos \phi \cdot \exp(\mu \cdot \tan \phi)} D_p \quad (2)$$

$$L_p = \tan \mu \cdot \exp\left(\frac{\pi}{2} \tan \phi\right) \cdot W_p \quad (3)$$

ここに、

$$\mu \equiv \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

である。

2つの荷重下に成立するすべり線場は、第1報で示した5種のすべり線場(A)～(E)に分類される(図1)。

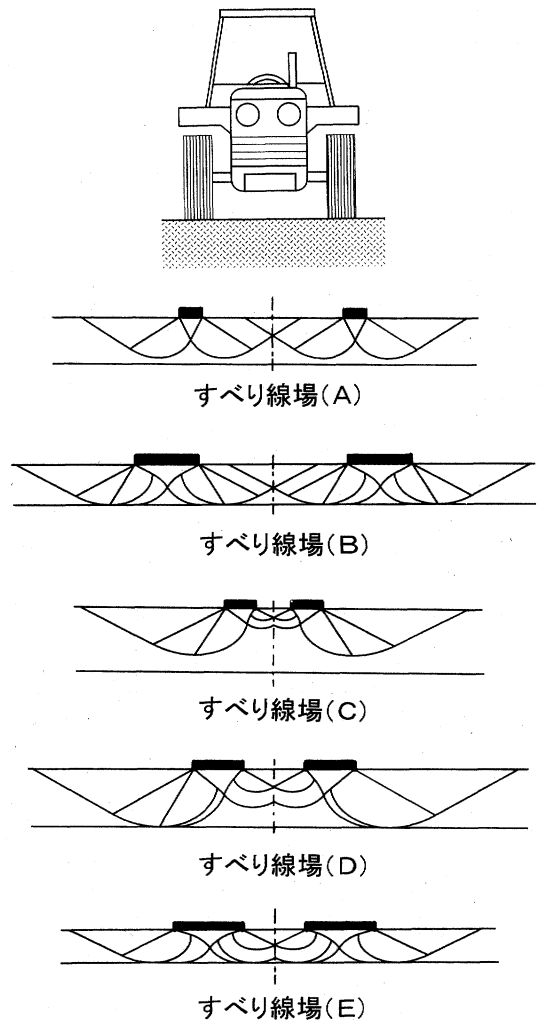


図1 仮定したすべり線場の分類

Fig. 1 Classification of assumed slip-line fields

IV 支持力解析

それぞれのすべり線場に基づいて支持力を算定する。なお、以下において q は支持力 Q (荷重底面に作用する単位面積当たりの鉛直力)を粘着力 c で除した無次元支持力を表す。

支持力を算定するには、各すべり線に作用する鉛直力を求めなければならない。図2を参照してすべり線に作用する応力は、すべり線に沿って作用する応力

$$\tilde{\sigma} = \bar{\sigma} \cos \phi - c \cdot \sin \phi \quad (5)$$

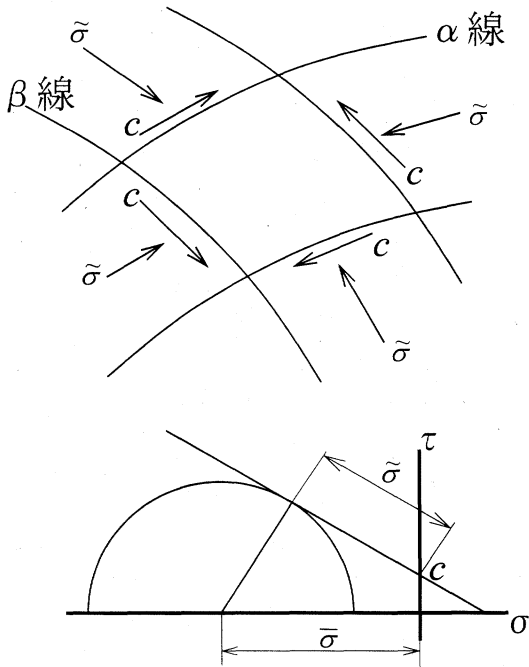


図2 すべり線に作用する応力状態
Fig. 2 State of stress acting on slip-lines

と、このすべり線に対応するすべり線方向から作用する応力(粘着力) c に分けられる。

Kötterの応力方程式を積分し次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \phi=0: \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0 + 2c(\theta - \theta_0) &= 0 \\ \phi>0: \frac{(\bar{\sigma} - H)}{(\bar{\sigma}_0 - H)} - \exp\{(\mp 2(\theta - \theta_0) \tan \phi)\} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、

$$H \equiv c \cdot \cot \phi \quad (7)$$

である。 θ はX軸から反時計回りに最大主応力方

向に測った角である。また、 $\bar{\sigma}_0$ および θ_0 はそれぞれ $\bar{\sigma}$ および θ の初期値を意味する。複号の上側および下側はそれぞれ時計回りのせん断応力が作用する α 線および反時計回りのせん断応力が作用する β 線に対応する。

(1) すべり線場(A) ($W/D \leq W_p/D_p$ かつ $L/W \geq L_p/W_p$) の場合

Prandtl場の受動三角域が荷重間で重なりあい、それぞれの荷重下でPrandtl解がそのまま成立する。Prandtl場に対する無次元支持力 q_0 は、

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= \pi + 2 = 5.142 (\phi = 0) \\ q_0 &= \cot \phi \{ \tan^2 \mu \cdot \exp(\pi \cdot \tan \phi) - 1 \} (\phi \neq 0) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

で与えられる¹⁾²⁾。

(2) すべり線場(B) ($W/D > W_p/D_p$ かつ $L/W \geq L_p/W_p$) の場合

耕盤の存在でPrandtl場は成立し得ず、耕盤に接したすべり線場が生じる。2つの荷重下のすべり線場は受動三角域で重なり、橋口ら³⁾⁴⁾による支持力解が適用できる。

(3) すべり線場(C) ($W/D \leq W_p/D_p$ かつ $L/W < L_p/W_p$) の場合

荷重間隔が狭くなると2つのすべり線場が干渉し合い、守島ら⁵⁾による支持力解が適用できる。

(4) すべり線場(D) ($W/D > W_p/D_p$ かつ $L/W < L_p/W_p$) の場合

本場合の支持力解は明らかにされておらず、第1報で提示したすべり線場に基づいて解析を行う。支持力を解析的に求めることは不可能であるので、図3に示すすべり線網目をを用い、数値解析により算定する。

まず、荷重内端(点b)から発生するすべり線に関する支持力を求める。図3に示すように α 線および β 線をそれぞれ角度間隔 ϕ が一定となるように分割し、順に番号を付す。 α 線 i と β 線 j の交点を離散座標 (i, j) で表すと、 (i, j) での θ 値は

$$\theta_{ij} = \frac{\pi}{2} + (i-j)\phi \quad (9)$$

で与えられるので、 (i, j) における平均応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ は式(6)を書き換え次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \phi=0: \bar{\sigma}_{ij} &= -(1+2(i-j)\phi) c \\ \phi>0: \bar{\sigma}_{ij} &= -c \cdot \cot \phi \left\{ \frac{\exp\{2(i-j)\phi \tan \phi\}}{1 - \sin \phi} - 1 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

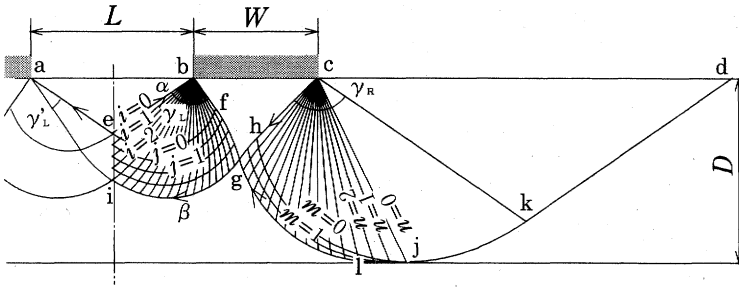


図3 $L \leq L_p$ かつ $W \geq W_p$ に対するすべり線場(D)
Fig. 3 Slip-line field (D) for $L \leq L_p$ and $W \geq W_p$

(m, n) で表すと、 (m, n) における平均応力 $\bar{\sigma}_{m,n}$ は式(6)より次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \phi=0: \bar{\sigma}_{m,n} &= -[1+2\{(n-m)\phi+\mu'\}]c \\ \phi>0: \bar{\sigma}_{m,n} &= -c \cdot \cot \phi \\ & \left\{ \frac{\exp\{2\{(n-m)\phi+\mu'\}\tan \phi\}-1}{1-\sin \phi} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここに、

$$\mu' \equiv \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (16)$$

支持力は荷重底面および剛性域bfghcに沿って作用する鉛直力の総和から求められる。すべり線fgに沿って作用する鉛直力は図4を参照し次式で求められる。

a 剛性域の斜辺bf上に作用する鉛直力 F_{b1}
点gを離散座標 (i_g, j_g) で表すと、

$$F_{b1} = \frac{x_{i_g,0}}{\cos(\theta_{i_g,0}-\mu)} \{ \bar{\sigma}_{i_g,0} \cdot \sin(\mu + \theta_{i_g,0}) + c \cdot \sin(\theta_{i_g,0}-\mu) \} \quad (11)$$

b $j=i-\bar{L}$ で対数らせんが荷重底面に接する場合、荷重底面に作用する鉛直力 $F_{b2}^{(1)}$; $F_{b2}^{(2)}$
 $(0,0) \sim (L,0)$ の範囲 $F_{b2}^{(1)} = x_{L,0} \cdot \bar{\sigma}_{L,0} \cdot \cos \phi$
上記以外 $(i-1, j-1) \sim (i, j)$ の範囲 $F_{b2}^{(2)} =$

$$(x_{i,j} - x_{i-1,j-1}) \cdot \frac{\bar{\sigma}_{i,j} + \bar{\sigma}_{i-1,j-1}}{2} \cdot \cos \phi \quad (12)$$

ここに、

$$L = \frac{(\frac{3}{4}\pi + \frac{\phi}{2})}{\phi} \quad (13)$$

とする。

c 剛性域に沿うすべり線fg上に作用する鉛直力 F_{b3} ($(i_g, j-1) \sim (i_g, j)$ の範囲)

$$F_{b3} = \frac{x_{i_g,j} - x_{i_g,j-1}}{\cos \left(\frac{\theta_{i_g,j} + \theta_{i_g,j-1} - \mu}{2} \right)} \times \left\{ \frac{\bar{\sigma}_{i_g,j} + \bar{\sigma}_{i_g,j-1}}{2} \sin \left[\frac{\theta_{i_g,j} + \theta_{i_g,j-1} - \mu}{2} + \mu \right] + c \cdot \sin \left[\frac{\theta_{i_g,j} + \theta_{i_g,j-1} - \mu}{2} \right] \right\} \quad (14)$$

次に、荷重外端(点c)から発生するすべり線に関する支持力を求める。 α 線および β 線に図3に示すように順に番号を付し、各節点を離散座標

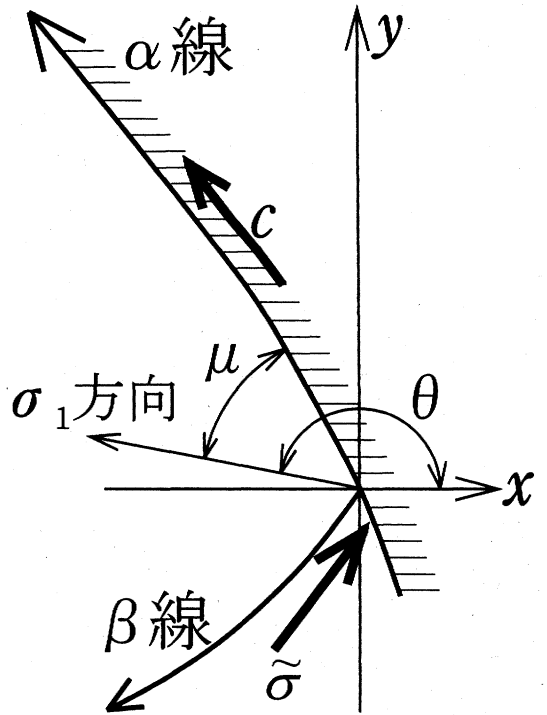


図4 剛性域に沿うすべり線b-f-gに作用する応力
Fig. 4 Stress acting on the slip-line b-f-g along the rigid body

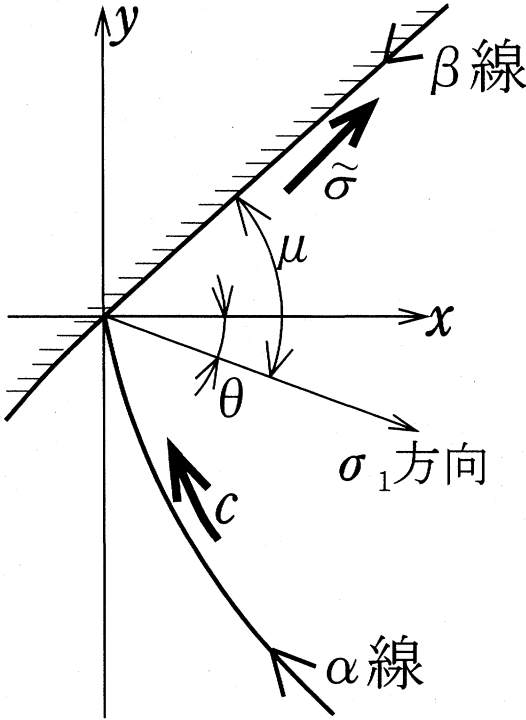
とする。

すべり線chgに沿って作用する鉛直力は、図5を参照し次式で求められる。

d 剛性域の斜辺ch上に作用する鉛直力 F_{c1}
点gを離散座標 (m_g, n_g) で表すと、

$$F_{c1} = \frac{x_{0,ng}}{\cos(\theta_{0,ng} - \mu)} \{ \tilde{\sigma}_{0,ng} \cdot \sin(\theta_{0,ng} + \mu) + c \cdot \sin(\theta_{0,ng} - \mu) \} \quad (17)$$

e $n = m - I_R$ で対数らせんが荷重底面に接する場合、荷重底面に作用する鉛直力 $F_{c2}^{(1)}$, $F_{c2}^{(2)}$



c-h-g側

図5 剛性域に沿うすべり線c-h-gに作用する応力
Fig. 5 Stress acting on the slip-line c-h-g along the rigid body

$$\left. \begin{aligned} &(0,0) \sim (I_R,0) \text{ の範囲} \\ &F_{c2}^{(1)} = x_{0,ls} \cdot \tilde{\sigma}_{0,ls} \cdot \cos \phi \\ &\text{上記以外 } (m-1, n-1) \sim (m, n) \text{ の範囲} \\ &F_{c2}^{(2)} = (x_{m,n} - x_{m-1, n-1}) \cdot \frac{\tilde{\sigma}_{m,n} + \tilde{\sigma}_{m-1, n-1}}{2} \cdot \cos \phi \end{aligned} \right\} (18)$$

ここに、

$$I_R = \frac{\frac{\pi}{2} + \phi}{\phi} \quad (19)$$

とする。

f 剛性域に沿うすべり線hg上に作用する鉛直力 F_{c3} ($(m-1, n_g) \sim (m, n_g)$ の範囲)

$$F_{c3} = \frac{x_{m,ng} - x_{m-1,ng}}{\cos \left[\frac{\theta_{m,ng} + \theta_{m-1,ng}}{2} - \mu \right]} \times \left\{ \frac{\tilde{\sigma}_{m,ng} + \tilde{\sigma}_{m-1,ng}}{2} \sin \left[\frac{\theta_{m,ng} + \theta_{m-1,ng}}{2} + \mu \right] + c \cdot \sin \left[\frac{\theta_{m,ng} + \theta_{m-1,ng}}{2} - \mu \right] \right\} \quad (20)$$

鉛直力は以上の総和をとり、

$$F = F_{b1} + F_{b2}^{(1)} + F_{b2}^{(2)} + F_{b3} + F_{c1} + F_{c2}^{(1)} + F_{c2}^{(2)} + F_{c3} \quad (21)$$

で与えられる。さらに、 F を W で除すと支持力 Q が求まる。

(5)すべり線場(E) ($W/D > W_p/D_p$ かつ $L/W < L_p/W_p$) の場合

すべり線場(D)の状態よりさらに W/D が大きくなると図6に示すように荷重両端から発生する両方のすべり線に剛盤の影響が生じる。支持力は荷重底面および剛性域bfgohcに沿って作用する鉛直力の総和から求められる。数値解析の手順はすべり線場(D)の場合と同様である。

V 算定結果

図7に無次元支持力 q と W/D の関係を示す($\phi = \pi/6$, $L/D=1$)。内部摩擦角は一般的な圃場の土の $\phi = \pi/6$ を想定した。 W/D の変化に応じ発生するすべり線場が変化し、それぞれのすべり線場に対応した支持力が得られる。本場合には、 $W_p/D_p=0.63$ また $L_p/W_p=4.29$ となり、 $L/D=1$ の条件では $W/D \leq 0.23$ においてPrandtl場であるすべり線場(A)が成立し、支持力は一定値を示す。また、 $0.23 < W/D \leq 0.63$ では2つの荷重下のすべり線場が干渉し、すべり線場(C)が成立する。さらに、 $W/D > 0.63$ ではすべり線場(D)または(E)が成立する。これらの境界となる値は解析的には求められないが、数値計算より $W/D=1.67$ で2つのすべり線場に区別されることがわかった。

図8に q と W/D の関係を L/D ごとに示す($\phi = \pi/6$)。支持力は W/D の増加とともに大きくなることがわかる。

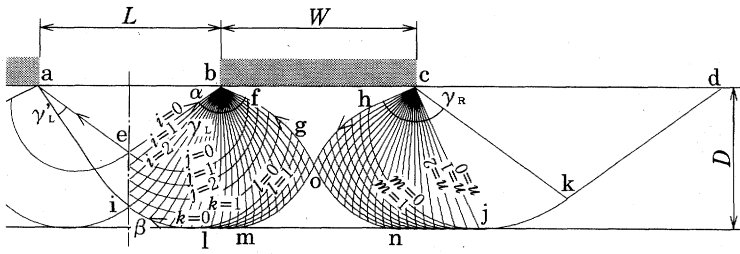


図6 $L \leq L_p$ かつ $W \geq W_p$ に対するすべり線場(E)
Fig. 6 Slip-line field (E) for $L \leq L_p$ and $W \geq W_p$

ようにすべり線場 (B) が単独で成立する。この支持力は図9中の右上がりの直線で示され、すべり線場 (D) より低い支持力値を示す。このことより L/D がある限度より小さいときには、すべり線場 (B) が成立することがわかる。

図11に q と W/D の関係を内部

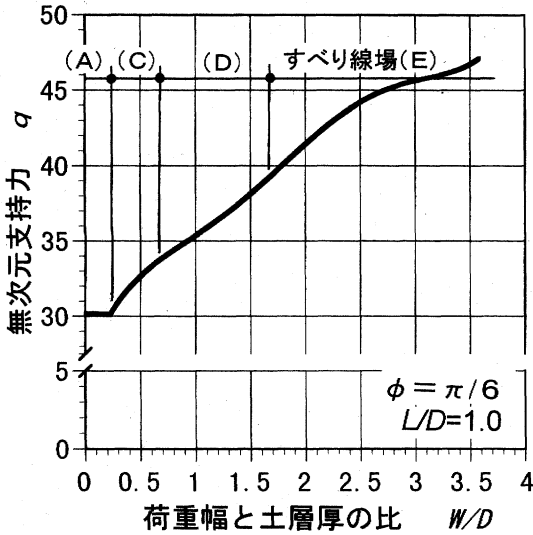


図7 荷重幅と支持力の関係におけるすべり線場の推移
Fig. 7 Variation of slip-line fields in the relation between the load width and the bearing capacity

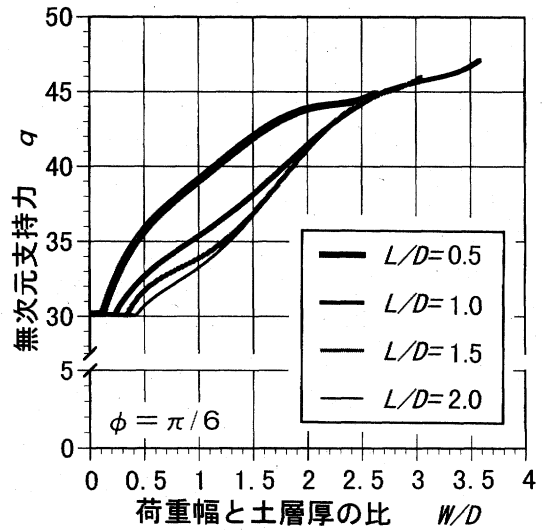


図8 荷重幅と支持力の関係
Fig. 8 Relation between the load width and the bearing capacity

図9に q と L/D の関係を示す。 $W/D=0.5$ のときにはすべり線が剛盤に接することなくすべり線場 (C) が成立する。 $W/D > 0.63$ では L/D の値によりすべり線場 (D) または (E) が成立する。それぞれのすべり線場の境界を数値計算より求め、図中に破線で示した。

本解析で求めたすべり線場は速度に関する全境界条件を満足し、すべり線場内で塑性仕事増分が正であるので、得られた支持力値は一つの上界解とみなせる。すべり線場 (C) において荷重間隔がある値以下では、最小支持力を与える Prandtl 場に従い破壊が生じ、すべり線場 (C) より低い支持力値を示すと報告されている⁵⁾。いま、2つの荷重が単一荷重のように作用すると、図10に示す

摩擦角 ϕ ごとに示す ($L/D=0.5, 1, 1.5$)。内部摩擦角は土や含水量によって変化するが、一般に軟らかい粘土の場合およそ $\phi=0 \sim \pi/45$ 、硬い粘土でおよそ $\phi=\pi/12$ 、砂混じりの粘土でおよそ $\phi=\pi/6$ 、砂の場合でおよそ $\phi=\pi/4.5 \sim \pi/4$ を示す。荷重幅が大きくなるほど支持力は増加するがその傾向は ϕ が大きくなるほど顕著になる。

実際の設計における本解析結果の適用について述べる。実際の圃場機械は、耕盤深さにもよるが、車輪型車両の場合 W/D が $0.5 \sim 3.5$ 、 L/W が $2.5 \sim 5$ 、履帯型車両の場合 W/D が $1 \sim 6$ 、 L/W が $1 \sim 2.5$ で使用されている。履帯型車両の場合、軟弱地通過能力および旋回性能の観点から接地圧が設計の重要項目となる。旋回性能は接地圧が低

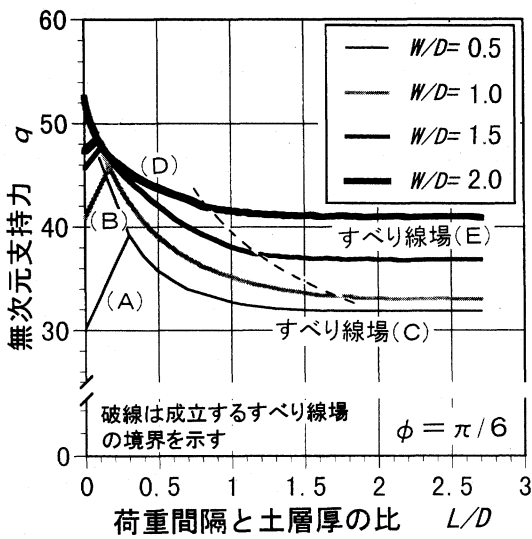


図9 荷重間隔と支持力の関係

Fig. 9 Relation between the load interval and the bearing capacity

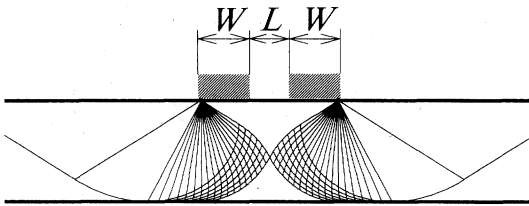


図10 二つの荷重が単一荷重として作用したときのすべり線場 (B)

Fig. 10 Slip-line field (B) for two loads acting as a single load

い方が良好であり、接地圧が地盤の許容接地圧を超えなければ車両通過可能といえる。本研究で求められた支持力は地盤の許容接地圧に相当すると考えられる。従来、Bekkerによる式⁶⁾が許容接地圧の計算に用いられているが、この式ではトレッドや耕盤深さによる影響は求められない。例えば、小形2条列自脱コンバイン ($W=300\text{mm}$, $L=400\text{mm}$) が一般の水田 ($D=200\text{mm}$) で使用される時、 $W/D=1.5$, $L/D=2.0$ となり、図9より q は約37となる。しかし硬い地層が比較的深いところに現れる湿田、あるいは深耕を行った水田など ($D=250\text{mm}$) では、同じコンバインを用いても $W/D=1.2$, $L/D=1.6$ となり q は図9より

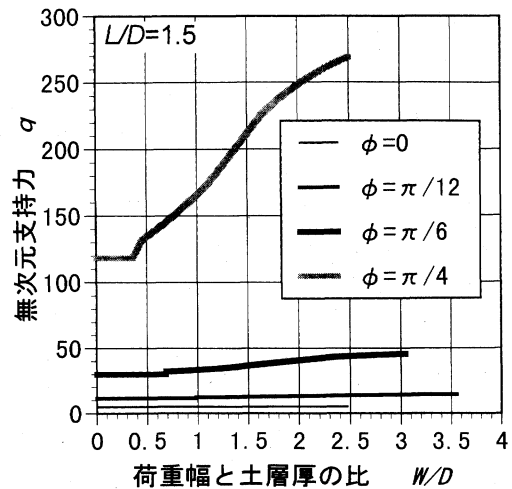
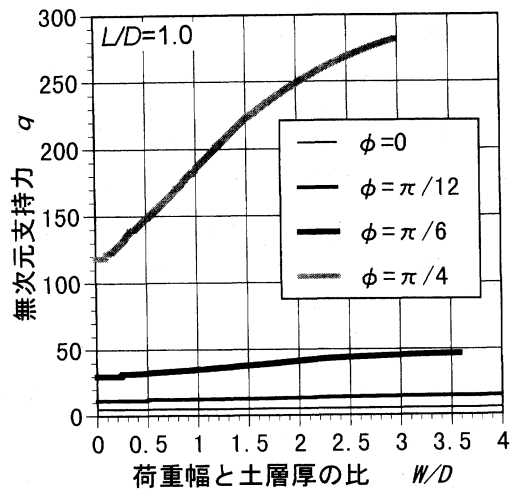
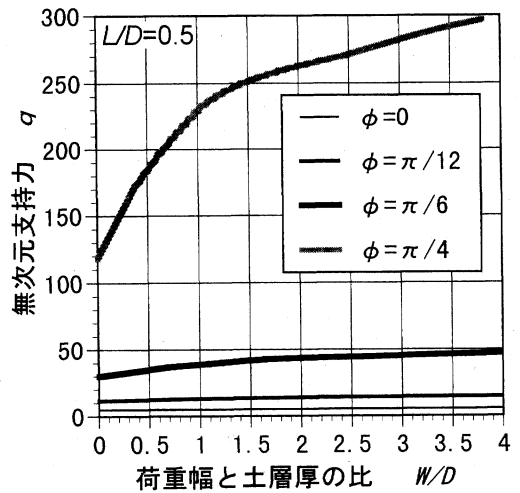


図11 内部摩擦角ごとの荷重幅と支持力の関係

Fig. 11 Relation between the load width and the bearing capacity for each value of ϕ

約32に低下する。これは耕盤が50mm深くなると許容接地圧が約14%低下することを意味する。 q の値はモデルの基本仮定のため設計寸法を直接定量的に決定するものではないが、耕盤が深い圃場で使用される車両に対しては履帯寸法の決定に際し、接地圧を低く設定する必要があるという1つの設計方針を与える。

また、現存の履帯・車輪幅(荷重幅)がすでに決定されている機械を作物の栽培様式を考慮し軌幅に対応するようトレッドの設計変更を行なう際、図9よりトレッドを大きくすると q が小さくなる場合がある。このような場合は接地圧について再度検討する必要がある。一方、トレッドを小さくする時は、支持力が増加する場合があります履帯・車輪幅を小さくし最適化することによるコスト削減の可能性を検討する余地があるといえる。

以上のように本解析で求められた q は走行部設計において、接地圧を検討するための1つの指針を与えるといえる。

VI 摘 要

硬い耕盤と軟弱な作土からなる圃場の車両に対

する支持力特性を明らかにするため、すべり線法による解析を行い、次の結果を得た。

- 1) 耕盤のある圃場における2つの近接する荷重に対する5種の干渉状態のすべり線場に基づいて支持力を求めた。
- 2) 荷重幅、荷重間隔および内部摩擦角による支持力の推移状況を明らかにした。

これにより、軟弱地盤において要求される車両走行部の設計に当たって合理的指針を与え得るものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Prandtl, L.: Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, 1(1), 15-20, 1921
- 2) Hill, R.: 塑性学(鷲津, 山田, 工藤訳), 培風館, 138-147, 1954
- 3) 橋口公一: 粗い岩盤上のタイ積土の支持力に関する塑性論的研究, 土と基礎, 17(5), 31-35, 1969
- 4) 松尾隆明, 橋口公一, 坂井 純: 耕盤圃場における支持力-沈下関係のすべり線解析, 農機誌, 50(6), 27-34, 1988
- 5) 守島正太郎, 橋口公一, 石黒悦爾: 履帯型車両の履帯間隔-支持力関係に対する塑性論解析, 農機誌, 30(2), 74-78, 1968
- 6) Bekker, M.: Off-the-Road Locomotion, The University of Michigan press, Ann Arbor, 27-29, 1960

コ メ ン ト

[読者のコメント]

本解析の前提として設定されている基本仮定は、現実の圃場とは異なる面を多く含んでいますので、極端に理想化した適用可能性の低いモデルによる解析結果が得られるに過ぎないのではないかと考えます。今後の取り組みとして、実験的検証及び現場適用性を高めるための理論修正については、どのようなお考えをお持ちでしょうか。

[コメントに対する著者の見解]

本解析は、土を平面ひずみの剛完全塑性体と仮定し解析を行なっているため、解析結果は定量的には実際の値と異なる可能性は考えられますが、参考文献³⁾⁴⁾の結果から判断し、支持力の定性的な傾向は表していると考えます。現在の解析結果から設計寸法を直接決定するには実験的な検証を加える必要がありますが、この結果は走行部の設計方針を決定する際の基礎資料として適用することができると考えます。定量的な解析を行なうに

は剛完全塑性論では理論的境界があり、また、すべり沈下のような過渡的な現象はすべり線解析では解析することができません。そこで今後、粘弾塑性構成式を導入した有限要素法を確立し、現場適用性をさらに高めた研究を行なう必要があると考えています。

[読者のコメント]

支持力 Q を粘着力 c で除した無次元支持力 q を求めるには、土壌に関するパラメータ ϕ 、 c を求める必要があると考えますが、具体的にはどのような方法で求めればよいのでしょうか。

[コメントに対する著者の見解]

ϕ および c はそれぞれ内部摩擦角および粘着力で、一定状態の土では定数となります。これらは、直接せん断試験、三軸圧縮試験および一軸圧縮試験などのせん断試験から求めることができます。