

## ピーク強度を示すセン断応力ヒズミ曲線について

吉 田 勲\*

## 1. 緒 論

硬い地盤において、セン断試験を行なうと図1に示すように、セン断応力( $\tau$ )～ヒズミ( $\epsilon$ )曲線にピーク強度が良くみられる。この $\tau \sim \epsilon$ 曲線を式で表わすことができれば、この式をもとに、車両のSoil thrustを求めることが可能である。そこで、 $\tau \sim \epsilon$ 曲線を正確に表わす式が必要となってくる。この場合の曲線式として、従来発表された式としては、Bekker<sup>1)</sup>式とKacigin and Guskov<sup>2)</sup>式とがある。前者は、この $\tau \sim \epsilon$ 曲線が非周期的な振動曲線に似ていることに注目し、この式を多少修正して、この場合の $\tau \sim \epsilon$ 曲線式として(1)式を提案した。他方後者は理論的に(7)式を導いた。本論文では筆者の実験より得た $\tau \sim \epsilon$ 曲線と上記両式の計算値とを比較し、その結果、両式ともセン断ヒズミが、最大セン断応力を示すセン断ヒズミ( $\epsilon_{opt}$ )を越えると実測値と計算値との間にはかなりの差があることがわかった。そこで、筆者はこの場合の $\tau \sim \epsilon$ 曲線を表わす式として、(9)、(10)式を提案した。本式は前二者の式よりも、より良く実測値に合っていることを示し、さらに、(9)、(10)式をもとに、この場合のSoil thrust算出式として、(13)、(16)式を提案している。

## 2. 記号の説明

本論文に使用した記号を以下に記す。

$B$ : 履帯幅(cm)

$C$ : 粘着力(kg/cm<sup>2</sup>)

$k_1$ : Bekker式の係数(1/cm)

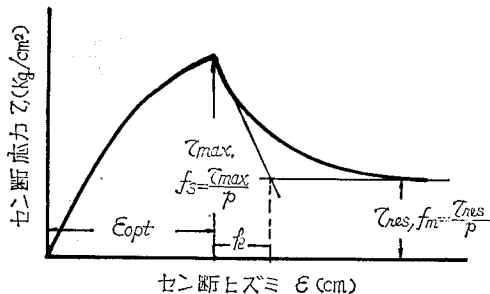


図-1 記号の説明図

\* 九州大学農学部 1970. 7. 12 受理

$k_2$ : Bekker式の係数

$t_r$ : 進行低下率(%、 $i = \frac{tr}{100}$ )

$l$ : 接地長(cm)

$SH$ : Soil thrust(kg)

$E_i(-l)$ : 積分指数関数

$p$ : 垂直応力(kg/cm<sup>2</sup>)

$\phi$ : 内部摩擦角(°)

$\tau$ : セン断応力(kg/cm<sup>2</sup>)

$\tau_{max}$ : 最大セン断応力(kg/cm<sup>2</sup>)

$\tau_{res}$ : 残留応力(kg/cm<sup>2</sup>)

$\epsilon$ : セン断ヒズミ、水平変位(cm)

$\epsilon_{opt}$ :  $\tau_{max}$ のときのセン断ヒズミ(cm)

$Y$ : (1)式の[ ]の値

$Y_{max}$ :  $Y$ の最大値

$f_s = \tau_{max}/p$

$f_m = \tau_{res}/p$

$k$ : 実験定数(cm)

3. 従来の $\tau \sim \epsilon$ 算出式

## 1) Bekker式

M. G. Bekker は硬い地盤における Soil thrust を求めるにあたり、セン断試験を行ない、その $\tau \sim \epsilon$ 曲線に $\tau_{max}$ が現われることに注目し、この場合の $\tau \sim \epsilon$ 曲線を表わす式として次式を提案した。これは現在良く使用されている。

$$\tau = \frac{C + p \tan \phi}{Y_{max}} \left[ e^{(-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 1})k_1 \cdot \epsilon} - e^{(-k_2 - \sqrt{k_2^2 - 1})k_1 \cdot \epsilon} \right] \quad (1)$$

ここで  $\tau_{max} = C + p \tan \phi$

(1)式は  $\epsilon = \epsilon_{opt}$  で  $\tau/\tau_{max}$  が最大値1となり、さらに  $\epsilon$  が増すと  $\tau/\tau_{max}$  が減少し、 $\epsilon = \infty$  で  $\tau/\tau_{max}$  は0になることを示している。これより(1)式は $\tau \sim \epsilon$ 曲線に $\tau_{res}$ が見られる場合にはあてはまらないことがわかる。

Bekker は(1)式の係数  $k_1$  は土の締固めを示しこの値は土の締固めとともに増大し、ディメンションは(1/L)であり、他方  $k_2$  は曲線の形を支配する重要な係数で、無次元であると述べている。係数  $k_1$ ,  $k_2$  を求めるにあ

たり A. D. Sela<sup>3)</sup> が良い方法を発表しているので参考までに要約すると以下のとおりである。

いま  $-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 1} = -A$  とおくと  
 $-k_2 - \sqrt{k_2^2 - 1} = -\frac{1}{A}$  となる。

1)式の  $Y_{max}$  は(1)式の [ ] 内の最大値であるから(2)式を微分して、第1次導関数をゼロとおき、 $k_1 \cdot \epsilon_{opt}$  を求めて、これを(2)式に代入すると求めることができる。

$$Y = e^{-A \cdot k_1 \cdot \epsilon} - e^{-A \cdot k_1 \cdot \epsilon_{opt}} \quad (2)$$

$$\left(\frac{dY}{d\epsilon}\right)_{\epsilon=\epsilon_{opt}} = -A \cdot k_1 e^{-A \cdot k_1 \cdot \epsilon_{opt}} + \frac{k_1}{A} e^{-A \cdot k_1 \cdot \epsilon_{opt}} = 0$$

$$\therefore k_1 \cdot \epsilon_{opt} = \frac{2A \log(1/A)}{1-A^2} \quad (3)$$

$$\therefore Y_{max} = e^{-2A \log(1/A)/(1-A^2)} - e^{-2 \log(1/A)/(1-A^2)} \quad (4)$$

したがって(1)式は次のように書ける。

$$\tau_{max} = \frac{Y}{Y_{max}} = \frac{e^{-\frac{2A^2 \log(1/A)}{(1-A^2)} \frac{\epsilon}{\epsilon_{opt}}} - e^{-\frac{2 \log(1/A)}{(1-A^2)} \frac{\epsilon}{\epsilon_{opt}}}}{e^{-\frac{2A^2 \log(1/A)}{(1-A^2)} \frac{\epsilon_{opt}}{\epsilon_{opt}}} - e^{-\frac{2 \log(1/A)}{(1-A^2)} \frac{\epsilon_{opt}}{\epsilon_{opt}}}} \quad (5)$$

参考までに(3)式、(5)式の計算結果を表-1に示す。表-1をもとに図-2(a)のように、横軸に  $\epsilon/\epsilon_{opt}$ 、縦軸に  $\tau/\tau_{max}$  をとり、図-2(a)の右に(b)図を書く。これは横軸にA値、縦軸に  $\epsilon/\epsilon_{opt} = 0.25, 0.50, 0.75, 1.50, \dots$  に対し(5)式より求めた  $\tau/\tau_{max}$  を示している。(b)図の上に、(c)図を描く。横軸はA値で、(b)図の場合と同じく、縦軸に(3)式より算出した  $k_1 \cdot \epsilon_{opt}$  を示す、次に一例として、 $k_1, k_2$  の求め方を説明する。図-2(a)に示した  $\epsilon/\epsilon_{opt} \sim \tau/\tau_{max}$  曲線は後述の図-3(1)の  $\tau \sim \epsilon$  曲線より求めたものである。図-2(a)の  $\epsilon/\epsilon_{opt} = 0.25, 0.50, 0.75, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0$  より出発して垂線を立て、 $\epsilon/\epsilon_{opt} \sim \tau/\tau_{max}$  曲線と交わせ、これらの交点より、右に水平線を引き図-2(b)にて、出発点の  $\epsilon/\epsilon_{opt}$  に相当する  $A \sim \tau/\tau_{max}$  曲線と交わせ、さらにこの交点より垂線を下しA軸と交わらせてこの点のAを読みとる。この例では  $\epsilon/\epsilon_{opt} = 1.25, 1.50, 1.75$  の場合(a)図より水平に引いた線と  $A \sim \tau/\tau_{max}$  曲線とは交わず、A値を知ることができない。 $\epsilon/\epsilon_{opt} = 0.25, 0.50, 0.75, 2.0$  の場合A値は求まり、Aの平均値は  $A = 0.44$  であった。A=0.44より垂線をたて、(c)図の  $A \sim k_1 \cdot \epsilon_{opt}$  曲線と交わせると  $k_1 \cdot \epsilon_{opt} = 0.9$  を得る。図-3(1)の  $\tau \sim \epsilon$  曲線より  $\epsilon_{opt} = 0.3m$  であるから、 $k_1 = 3, k_2$  は次式より  $k_2 = 1.36$  となる。

参考までに(3)式、(5)式の計算結果を表-1に示す。表-1をもとに図-2(a)のように、横軸に  $\epsilon/\epsilon_{opt}$ 、縦軸に  $\tau/\tau_{max}$  をとり、図-2(a)の右に(b)図を書く。これは横軸にA値、縦軸に  $\epsilon/\epsilon_{opt} = 0.25, 0.50, 0.75, 1.50, \dots$  に対し(5)式より求めた  $\tau/\tau_{max}$  を示している。(b)図の上に、(c)図を描く。横軸はA値で、(b)図の場合と同じく、縦軸に(3)式より算出した  $k_1 \cdot \epsilon_{opt}$  を示す、次に一例として、 $k_1, k_2$  の求め方を説明する。図-2(a)に示した  $\epsilon/\epsilon_{opt} \sim \tau/\tau_{max}$  曲線は後述の図-3(1)の  $\tau \sim \epsilon$  曲線より求めたものである。図-2(a)の  $\epsilon/\epsilon_{opt} = 0.25, 0.50, 0.75, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0$  より出発して垂線を立て、 $\epsilon/\epsilon_{opt} \sim \tau/\tau_{max}$  曲線と交わせ、これらの交点より、右に水平線を引き図-2(b)にて、出発点の  $\epsilon/\epsilon_{opt}$  に相当する  $A \sim \tau/\tau_{max}$  曲線と交わせ、さらにこの交点より垂線を下しA軸と交わらせてこの点のAを読みとる。この例では  $\epsilon/\epsilon_{opt} = 1.25, 1.50, 1.75$  の場合(a)図より水平に引いた線と  $A \sim \tau/\tau_{max}$  曲線とは交わず、A値を知ることができない。 $\epsilon/\epsilon_{opt} = 0.25, 0.50, 0.75, 2.0$  の場合A値は求まり、Aの平均値は  $A = 0.44$  であった。A=0.44より垂線をたて、(c)図の  $A \sim k_1 \cdot \epsilon_{opt}$  曲線と交わせると  $k_1 \cdot \epsilon_{opt} = 0.9$  を得る。図-3(1)の  $\tau \sim \epsilon$  曲線より  $\epsilon_{opt} = 0.3m$  であるから、 $k_1 = 3, k_2$  は次式より  $k_2 = 1.36$  となる。

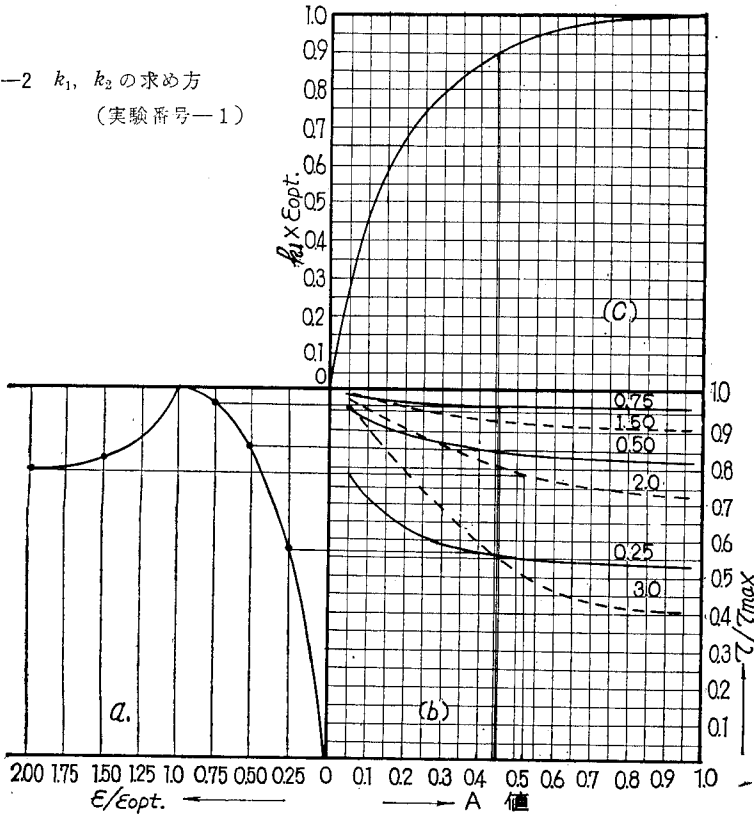
$$k_2 = \frac{1+A^2}{2 \cdot A} \quad (6)$$

Bekker式の欠点としては、 $\epsilon/\epsilon_{opt}$  より立てに垂直線と  $\epsilon/\epsilon_{opt} \sim \tau/\tau_{max}$  曲線の交点より引いた水平線と出発点の  $\epsilon/\epsilon_{opt}$  に相当する  $A \sim \tau/\tau_{max}$  曲線とが交わずA値が求まらない場合が多く、したがって  $k_2, k_1$  値が得られず、(1)式の曲線が描けない場合が多いことがあげられる。

2) Kacigin and Guskov 式

彼らは Bekker 式(1)の  $k_1, k_2$  の意味が明確でないとして  $\tau \sim \epsilon$

図-2  $k_1, k_2$  の求め方 (実験番号-1)



曲線を表わす式として、(7)式をあたえた。

$$\frac{\tau}{p} = \frac{\tau_{res}}{p} \left[ 1 + \frac{a}{\cosh(\epsilon/\epsilon_{opt})} \right] \tan h(\epsilon/\epsilon_{opt}) \quad (7)*$$

Kaigin and Guskov は(7)式の定数  $a$  はピーク応力における摩擦係数と残留応力との比により変化するが、 $a$  の値は次式で十分に表わせるとしている。

$$a = 2.55 \left( \frac{f_s - f_m}{f_m} \right)^{0.925} = 2.55 \left( \frac{\tau_{max} - \tau_{res}}{\tau_{res}} \right)^{0.925} \quad (7-1)$$

(7)式の係数  $\epsilon_{opt}$ 、 $a$  は(1)式の  $k_1$ 、 $k_2$  よりもより簡単に求められる利点がある。この場合の Soil thrust 算出式は(8)式となる。

$$SH = \frac{B \cdot \tau_{res} \epsilon_{opt}}{i} \left[ \log \cosh \left( \frac{il}{\epsilon_{opt}} \right) - a \left( \frac{1}{\cosh \left( \frac{il}{\epsilon_{opt}} \right)} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

### 3. 筆者の提案式

筆者はこの場合の  $\tau \sim \epsilon$  曲線式として次式を提案する。

$$\epsilon \leq \epsilon_{opt} \quad \tau = \tau_{max} (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_{opt}}) \quad (9)$$

$$\epsilon \geq \epsilon_{opt} \quad \tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_{res}) (1 - e^{-\frac{\epsilon - \epsilon_{opt}}{k}}) \quad (10)$$

(9)式は  $\epsilon$  の増加とともに  $\tau$  は指数的に増大し、 $\epsilon = \epsilon_{opt}$  にて、 $\tau = \tau_{max}$  となる。(10)式は  $\epsilon > \epsilon_{opt}$  で  $\epsilon$  の増加について、 $\tau$  は  $\tau_{max}$  から指数的に減少し、 $\epsilon = \infty$  のとき  $\tau = \tau_{res}$  となることを示している。(10)式の中の係数  $k$  は図-1に示したように、 $\epsilon = \epsilon_{opt}$ 、 $\tau = \tau_{max}$  の点より、セリ断応力減少曲線に接する線を引き、 $\tau = \tau_{res}$  の水平線と交わせ、この交点の  $\epsilon = \epsilon_{opt}$  よりの横距(cm)である。 $k$  が大きいことはセリ断応力の減少が緩慢に行なわれ逆の場合には急激に起こることを示している。

### 4. 実測値と計算値の比較

現位置表層セリ断試験機(バーグラフセリ断試験機)を用いてセリ断試験を10回行ない、その時の土質状態を表-1に、その結果を図-3に示す。なお供試土の土性は  $G_s = 2.55$ 、粘土分11.0%、シルト分18.9%、砂分70.1%で三角座標分類法によると土質名は砂質ロームである。図-3より求めた  $a$ 、 $\epsilon_{opt}$ 、 $k$ 、 $\tau_{max}$ 、 $\tau_{res}$ 、 $\epsilon$  値を表-1に併記する。図-3(1)には図-2で求めた  $k_1$ 、 $k_2$  値を(1)式に代入して求めた  $\tau \sim \epsilon$  曲線を記号  $B$ 、表-1の  $a$ 、 $\epsilon_{opt}$ 、 $\tau_{max}$  値を(7)式に代入して得た曲線を記号  $K, G$ 、筆者の提案式による曲線を記号  $Y$  でそれぞれ示しているが、 $\epsilon > \epsilon_{opt}$  では差が大きい。 $K, G$  曲線は  $\epsilon \leq \epsilon_{opt}$ 、 $\epsilon \geq$

表-1 Sela 法による  $k_1$

A	$k_2$	$k_1 \cdot (\epsilon_{opt})$	$\epsilon/\epsilon_{opt}$ に対する					
			0.25	0.50	0.75	1.25	1.50	1.75
0.05	10.025	0.300	0.787	0.960	0.995	0.998	0.995	0.991
0.10	5.050	0.465	0.715	0.930	0.990	0.995	0.986	0.975
0.15	3.408	0.582	0.669	0.908	0.985	0.992	0.976	0.957
0.20	2.600	0.671	0.637	0.891	0.981	0.989	0.966	0.939
0.25	2.125	0.739	0.613	0.877	0.977	0.987	0.957	0.921
0.30	1.817	0.794	0.594	0.867	0.975	0.984	0.949	0.906
0.35	1.604	0.837	0.580	0.858	0.972	0.982	0.942	0.892
0.40	1.450	0.873	0.569	0.850	0.970	0.981	0.936	0.879
0.45	1.336	0.901	0.559	0.845	0.969	0.979	0.931	0.869
0.50	1.250	0.924	0.552	0.840	0.967	0.978	0.926	0.859
0.55	1.184	0.943	0.547	0.836	0.966	0.977	0.922	0.852
0.60	1.133	0.958	0.542	0.833	0.966	0.976	0.919	0.846
0.65	1.094	0.970	0.538	0.831	0.965	0.975	0.917	0.840
0.70	1.064	0.979	0.536	0.829	0.964	0.975	0.914	0.836
0.75	1.042	0.986	0.533	0.826	0.964	0.974	0.913	0.833
0.80	1.025	0.992	0.532	0.825	0.964	0.974	0.912	0.830
0.85	1.013	0.996	0.531	0.825	0.963	0.974	0.911	0.829
0.90	1.006	0.998	0.530	0.825	0.963	0.974	0.910	0.828
0.95	1.001	1.000	0.529	0.824	0.963	0.974	0.910	0.827

$\epsilon_{opt}$  いずれの側でも実測値とは大きなはだたりがある。また(7)式の値は  $\epsilon_{opt}$  で  $\tau$  は最大値とならず、 $\epsilon_{opt}$  よりも少し大きい値で最大値となる。Y曲線の場合、 $\epsilon \leq \epsilon_{opt}$  では、K.G 曲線と同様にかなりの差があるが、 $\epsilon = \epsilon_{opt}$  で、 $\tau = \tau_{max}$  を与え、 $\epsilon \geq \epsilon_{opt}$  では実測値と計算値はよく合っている。図-3(2)~(10)では(1)式の係数、 $k_1, k_2$  値は求まらず、(1)式による  $\tau \sim \epsilon$  曲線は描けなかった。以後(7)式および筆者の提案式による計算値と実測値との

比較をする。図-3全体より(7)式については、 $\epsilon \leq \epsilon_{opt}$  において実測した  $\tau \sim \epsilon$  曲線が上に大きくふくらんだ形をしている場合、計算値は実測値よりもかなり小さい値を与える。その他の場合は良い適合を示している。 $\epsilon \geq \epsilon_{opt}$  では  $\tau \sim \epsilon$  曲線が非常にゆるやかな場合、適合すると推定されるが、筆者の実験では  $\epsilon$  が  $\epsilon_{opt}$  を越えて、セン断応力が急激に減少する場合には(7)式は不適であると言える。(9)、(10)式より求めた曲線Yは  $\epsilon_{opt} \geq \epsilon$  では(7)式の

表-2 セン断応力ヒズミ曲線より求めた諸係数値と実験時の状態

実験番号	$\tau_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{res}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{opt}$ (cm)	$k$ (cm)	$a$ (cm)	$k_1$ (cm <sup>-1</sup> )	$k_2$	実験時の状態	
								含水比(%)	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.126	0.102	0.30	0.06	0.77	3.0	1.36	16.1	1.03
2	0.084	0.052	1.10	0.60	1.73	...	...	24.5	1.16
3	0.088	0.044	0.40	0.13	2.55	...	...	14.4	1.04
4	0.550	0.455	0.30	0.14	0.88	...	...	11.0	1.08
5	0.140	0.092	0.95	0.32	1.20	...	...	24.3	1.15
6	0.042	0.020	0.50	0.12	2.36	...	...	9.0	1.13
7	0.186	0.090	0.60	0.40	2.42	...	...	19.6	1.31
8	0.112	0.035	0.50	0.14	4.86	...	...	15.6	0.90
9	0.100	0.056	0.40	0.30	2.09	...	...	19.3	1.24
10	0.136	0.100	1.20	0.28	1.10	...	...	25.8	1.19

\* (7)式の記号は原書のそれと同じではない。

$k_2$  値算出表 (吉田)

$\tau/\tau_{max}$ の 値									
2.0	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	
0.988	0.984	0.980	0.977	0.973	0.969	0.966	0.962	0.958	
0.964	0.953	0.942	0.931	0.920	0.910	0.899	0.889	0.879	
0.937	0.917	0.897	0.878	0.859	0.841	0.822	0.805	0.787	
0.909	0.880	0.852	0.824	0.797	0.770	0.745	0.720	0.697	
0.883	0.845	0.806	0.772	0.737	0.704	0.672	0.642	0.613	
0.859	0.812	0.767	0.723	0.682	0.643	0.606	0.571	0.538	
0.837	0.783	0.730	0.680	0.633	0.589	0.547	0.509	0.473	
0.818	0.757	0.698	0.642	0.590	0.541	0.497	0.455	0.417	
0.802	0.735	0.670	0.609	0.553	0.501	0.453	0.410	0.371	
0.787	0.715	0.646	0.581	0.521	0.466	0.417	0.372	0.332	
0.775	0.699	0.625	0.557	0.494	0.437	0.386	0.340	0.300	
0.766	0.685	0.609	0.537	0.472	0.413	0.361	0.315	0.274	
0.757	0.674	0.595	0.521	0.454	0.394	0.341	0.294	0.253	
0.751	0.665	0.583	0.508	0.439	0.378	0.324	0.277	0.236	
0.746	0.658	0.575	0.498	0.428	0.366	0.312	0.264	0.224	
0.742	0.653	0.568	0.490	0.419	0.357	0.302	0.255	0.214	
0.739	0.649	0.563	0.484	0.413	0.350	0.295	0.248	0.207	
0.737	0.646	0.560	0.481	0.409	0.346	0.290	0.243	0.202	
0.736	0.645	0.558	0.479	0.407	0.343	0.288	0.241	0.200	

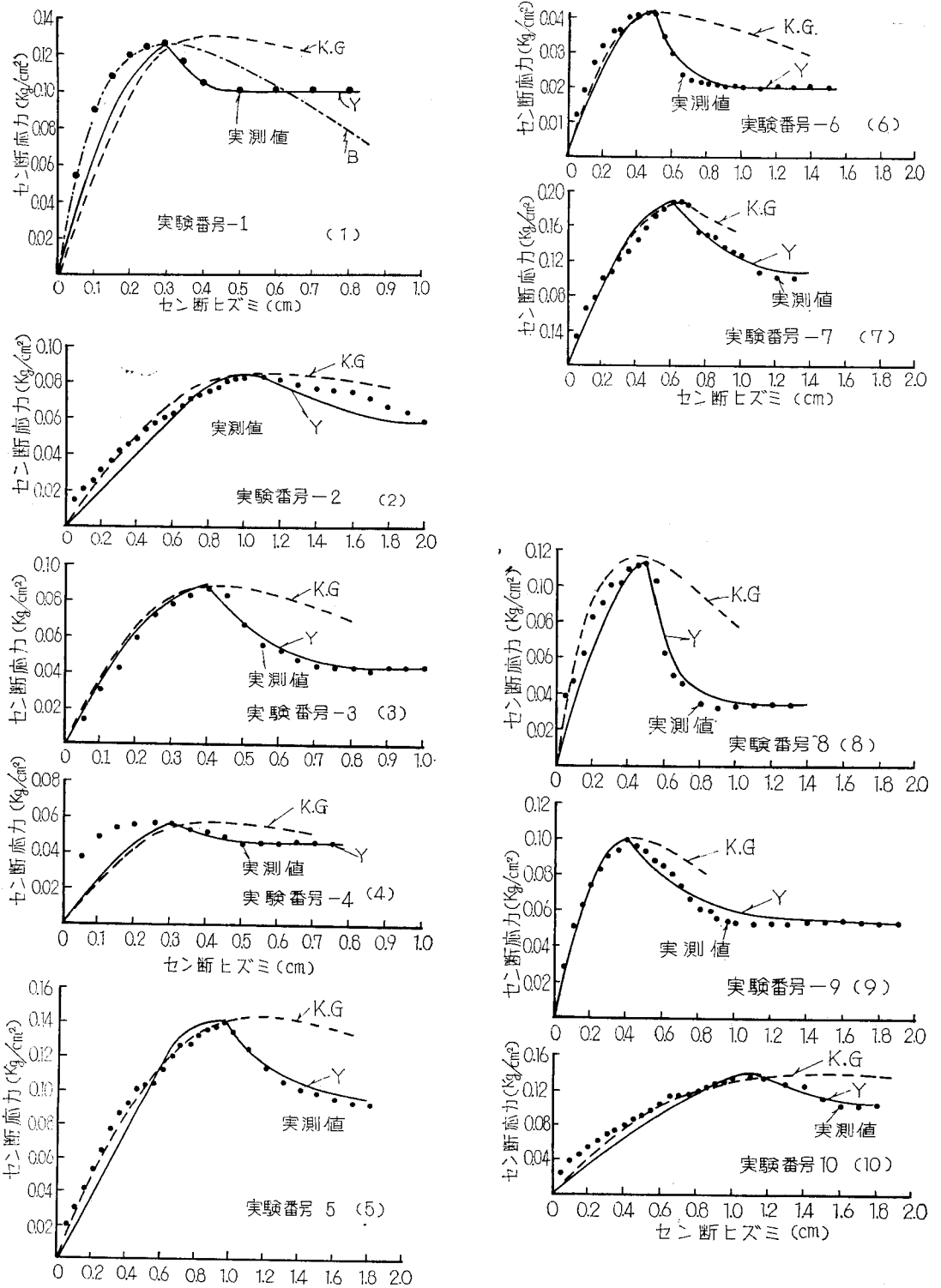


図-3 実測した  $\tau \sim \epsilon$  曲線と計算曲線との比較

場合と全く同様なことと言え、上に大きくふくらんだ形の  $\tau \sim \varepsilon$  曲線には合わない。しかし、 $\varepsilon = \varepsilon_{opt}$  では(7)式と異なり、必ず  $\tau = \tau_{max}$  となり、実測値と一致している。 $\varepsilon > \varepsilon_{opt}$  では10例とも実測値とよく一致している。したがって筆者の提案式は Bekker 式や Kacigin and Guskov 式よりも実測値に近い  $\tau \sim \varepsilon$  曲線を与えると考えられる。

#### 4. Soil thrust 算出式

この場合の Soil thrust は次のようにして求める。

$\varepsilon \leq \varepsilon_{opt}$  のとき(9)式に  $\varepsilon = il$  を代入し、接地圧分布を一様と仮定すると、クローラ型車両の Soil thrust は接地長にわたって積分することにより求まる。

$$SH_1 = B \int_0^l \tau_{max} (1 - e^{-\frac{il}{\varepsilon_{opt}} - il}) dl$$

$$= B \cdot \tau_{max} \cdot D \left[ \frac{-1}{1+R} + \frac{e^{-R}}{1+R} - \int_0^R \frac{e^{-R}}{1+R} dR \right] \quad (11)$$

ここで、 $R = \frac{il}{\varepsilon_{opt} - il}$ ,  $D = \frac{\varepsilon_{opt}}{i}$

(11)式の右辺第3項は積分指数関数<sup>5)</sup>を利用すると求まる。 $t=R+1$ とおく。

$$I = \int_0^R \frac{e^{-R}}{1+R} dR = e \int_1^t \frac{e^{-t}}{t} dt = e \left[ \int_1^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt - \int_t^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt \right]$$

$$= e \left[ -0.2194 - Ei(-t) \right] \quad (12)$$

(12)式を(11)式に代入すると

$$SH_1 = B \cdot D \cdot \tau_{max} \left[ \frac{1}{1+R} (e^{-R} - 1) - e \left( -0.2194 - Ei(-t) \right) \right] \quad (13)$$

$il = \varepsilon_{opt}$  のときは

$$SH_1 = B \cdot D \cdot \tau_{max} [ e \times 0.2194 ]$$

$$= B \cdot D \cdot \tau_{max} \cdot 0.5964 \quad (14)$$

$\varepsilon \leq \varepsilon_{opt}$  における Soil thrust は

$$SH = SH_1$$

である。

$\varepsilon \geq \varepsilon_{opt}$  のとき

同様にして

$$SH_2 = B \int [ \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_{res}) (1 - e^{-\frac{il - \varepsilon_{opt}}{k}}) ] dl$$

$$= \frac{B}{i} \left[ \tau_{max} \cdot E - (\tau_{max} - \tau_{res}) \times \right.$$

$$\left. \left( E + \frac{1}{k} (e^{-\frac{E}{k}} - 1) \right) \right] \quad (15)$$

ここで、 $E = il - \varepsilon_{opt}$

この場合の Soil thrust は(16)式となる。

$$SH = (14式) + (15式)$$

$$= B \cdot D \cdot \tau_{max} \cdot 0.5964 + \frac{B}{i} \left[ \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_{res}) \left( E + \frac{1}{k} (e^{-\frac{E}{k}} - 1) \right) \right] \quad (16)$$

#### 5. 結論

以上のことを要約すると次のごとくなる。

- 1) 従来、ピーク強度を示す上の  $\tau \sim \varepsilon$  曲線を表わす式として発表されている式には Bekker 式と Kacigin and Guskov 式とがある。前者は係数  $k_1, k_2$  の決定が困難で、 $\tau \sim \varepsilon$  曲線が求まらない場合が多い。他方 Kacigin and Guskov 式は実測値とあまり良い一致を示していない。
- 2) 筆者はこの場合の  $\tau \sim \varepsilon$  曲線を示す式として(9)、(10)式を提案した。この式は  $\varepsilon \leq \varepsilon_{opt}$  で上に大きくふくらんでいる曲線にはあまり良い一致を示していないが、他の場合はかなり良く一致している。 $\varepsilon = \varepsilon_{opt}$  のとき、 $\tau = \tau_{max}$  となり、 $\varepsilon \geq \varepsilon_{opt}$  で実測値と計算値はかなり良く適合している。筆者の提案式も必ずしも完全無欠ではないが前二者よりも実測値に近い計算値を与える。
- 3) (9)、(10)式より、この場合の Soil thrust 算出式として、(13)、(16)式を提案する。  
今後、模型や現地実験を行ない、(13)、(16)式の適用範囲を確かめたい。

#### 参考文献

- 1) M.G. Bekker: Introduction to Terrain-Vehicle Systems, pp. 134-133, The University of Michigan Press, Ann Arbor
- 2) V.V. Kacigin and V.V. Guskov: The Basis of Tractor Performance Theory, Journal of Terramechanics, (1938), Vol. 5, No. 3, pp. 43-66.
- 3) A.D. Sela: On the Slip and the tractive effort, Proc. First Int. Cnt. Mechanics of Soil-Vehicle Systems, (June 1931), pp. 537-604
- 4) 吉田 勲: SOIL THRUST に関する一考察, 農業機械学会誌, (1939), Vol. 31, No. 3, pp. 199-201
- 5) 森口繁一, 宇田川銚久, 一松信: 数学公式1, p154, 岩波全書。