

水平振動による砂の支持力減少に 関する実験的一考察

山 内 豊 聡*

1. ま え が き

粘着力のない砂や礫は、ある程度以上の加速度の振動をうけると粒子間の圧力が周期的に変化し、粒子が相互に位置を変えやすくなり、このためせん断強度は急激に減少し、液体としての性質を帯びようになる。この現象を砂礫の液化現象 (Liquefaction) と言っている。

いまこのような砂礫の支持力をその液化現象に着目して、地震にかぎらず各種の水平振動に対する支持力の計算法に関して一つの実験的考察を行うわけであるが、砂の支持力を計算する方法としては静止時の計算法に何らかの工夫を加えて行う Static な方法と、動力学的な解析にもとづいて行う方法とに分けることができよう。後者の動力学的な方法は今後の問題であり、今日でも重力と振動の最大加速度との合力が図-1のように鉛直線に対して傾く角度だけ、地盤を傾けて静的に計算するより外に手段がない。この方法は振動時にも地盤の一様性が変らないものとして考えているから、勿論砂礫の液化現象は考えていない。砂礫の液化現象が無視されるような比較的小さい加速度の範囲において、且つ比較の周期の大きい水平振動に対しては実用的な方法としてみとめられるようである。

岡本教授は図-2のようにして0点に関するモーメントの釣合いから前述の θ 、荷重の傾き ε 及び内部摩擦角の函数として支持力の式を導かれ、300gal程度以下の範囲ではその式の計算値と、周期1.33~0.33secの水平振動の実験による支持力とがかなり一致することを示されている。¹⁾

しかし支持力は浅い部分の問題であり、この浅い部分は殊に振動に対する自由度が大きく液化現象のおこりやすい部分であるから、加速度が大きくなると砂の土性的変化が相当に考慮されるべきであると考ええる。砂の土性

的变化は内部摩擦角の修正によってあらわされるから、振動時に内部摩擦角を減少して静的に支持力を計算する方法も一つの方法とみとめてよいのではないかと思われる。このような方法はこれまでになかったわけではなく、かつて佐野博士は振動時に砂の内部摩擦角を静止時の内部摩擦角から前述の θ だけ減じて計算する方法を提案されたが、勿論砂の液化現象を考えたものではないから、考え方の根拠は全く違っていた。砂の液化現象を考えないかぎり、摩擦角をこのようにして修正することは明らかに不合理であるから、地盤傾斜法の提案以来ほとんど用いられていないのも当然であろう。いま砂の液化現象を考えるにしても振動時の内部摩擦角を合理的に定める方法はなお問題であり、それをできるだけ理論的に求めることがのぞましいわけである。

2. 著者の実験装置

地震時における土圧や支持力をしらべるための一般の水平振動の模型実験では、比較的周期の大きいものについて行われ、大体毎秒3サイクル以下のものであるが、容器に入った水の動きから考えても、同一加速度の振動でも小さい周期の場合と大きい周期の場合とでは、砂箱の中の砂の動きは図-3のように大分異なりそうである。小型の模型実験としては小さい周期の振動の方がスケールの影響とくに壁面の影響が小さくてすむのではなからうか。著者の実験装置は小周期振動を考えたもので、懸吊したプラスチック製の砂箱に毎秒10サイクルまでの強制単弦振動をあたえることができる(図-4)。加速度を大きくするため周期を次第に小さくする方法はモーターの回転速度の増加によって行った。振動の所望の時期の振幅(A)と周期(T)は、砂箱にとりつけた針が描く振動記録計上のスス書きの記録によって読みとるようにした。したがって最大加速度は

$$\alpha_{1ax} = \frac{4\pi^2 A}{T^2}$$

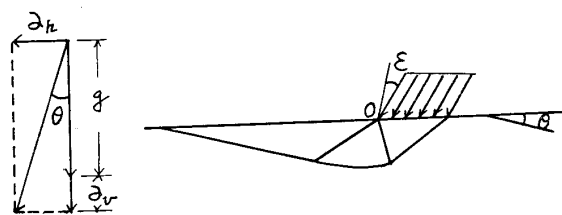


図-1

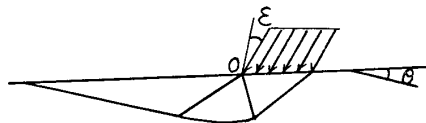
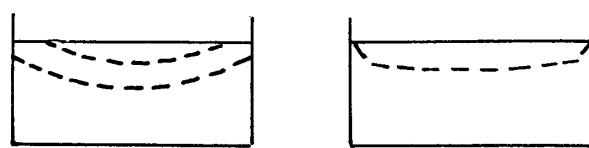


図-2



大きい周期

小さい周期

図-3

* 九州大学助教授，工学部土木教室

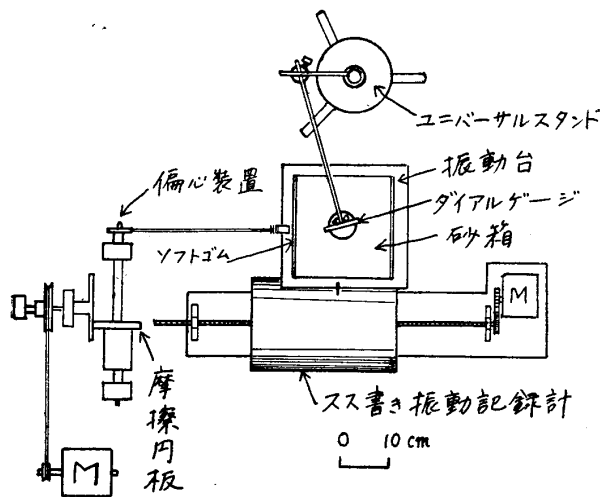


図-4

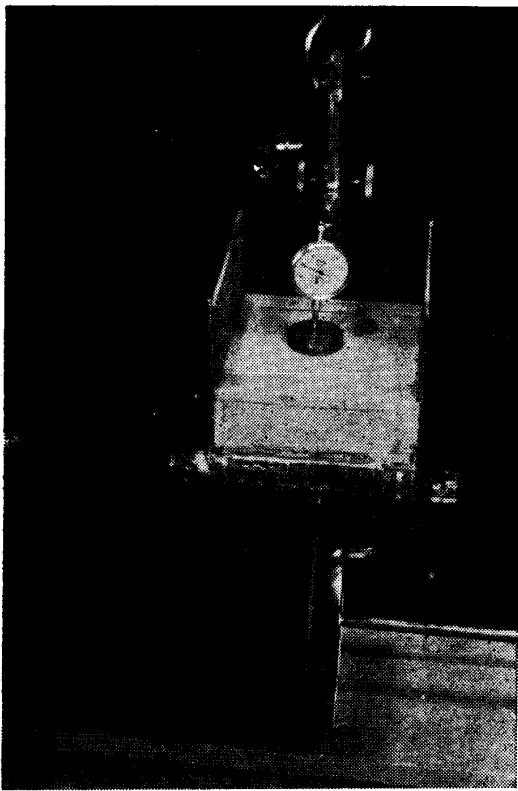


写真-1

として簡単に求められる。支持力測定の場合は円形真鍮板を用いこれを自由に載荷することとし、その沈下量はユニバーサルスタンドによって円板の略々中央に保持されたダイヤルゲージの読みによってしらべることにした(写真-1)。円板は自由に載荷したものであるから、載荷板が移動するときはそれにともなってダイヤルゲージを追隨する操作が必要である。

3. 予 備 実 験

砂の液化現象そのものをしらべるのと、装置の規模の影響にもとづいて試験の方法を適當にすることを目的として、支持力の試験にうつる前に次ののべるような若干

の予備実験を行った。

砂は標準砂であり、粒子の比重 2.63, 有効粒径 $D_{10} = 0.16\text{mm}$, 均等係数 $U = D_{60}/D_{10} = 1.5$ である。砂箱に詰めたときの間隙比は次のとおりであった。各実験ではそれぞれなるべく疎な詰め方になるようにした。

	乾燥状態 ($w = 0.5\%$)	飽和状態 ($w = 24\%$)
疎に詰めたとき	0.89	0.83
密に詰めたとき	0.66	0.63

この実験では静止の状態にある砂の mass に振動をあたえ、次第に加速度を増大するのであるが、実験の結果に影響するのはまづ加速度の増加の割合及び載荷板の直径である。

数種の径の載荷板が 1cm 沈下するときの加速度の大きさをそのときまでの静止時からの振動継続時間によって比較すれば図-5のようになり、時間をかけるほど小さい加速度で同一の沈下量に達する。このように砂の振動による沈下量は加速度の外に振動時間の長さが問題になるので、以後の実験では砂が砂箱の中で完全に流動するようになるまでの振動時間を略々 1 分間と定めた。砂が実際に流動状態を示す加速度は 略々 1000gal 附近であ

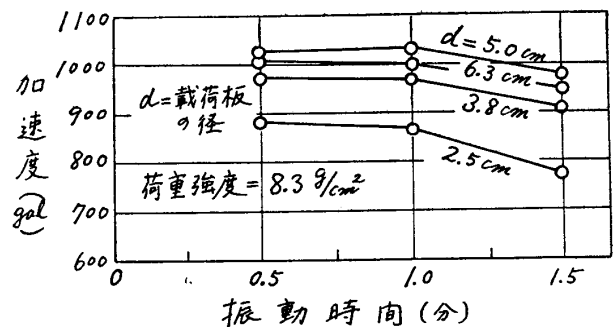


図-5

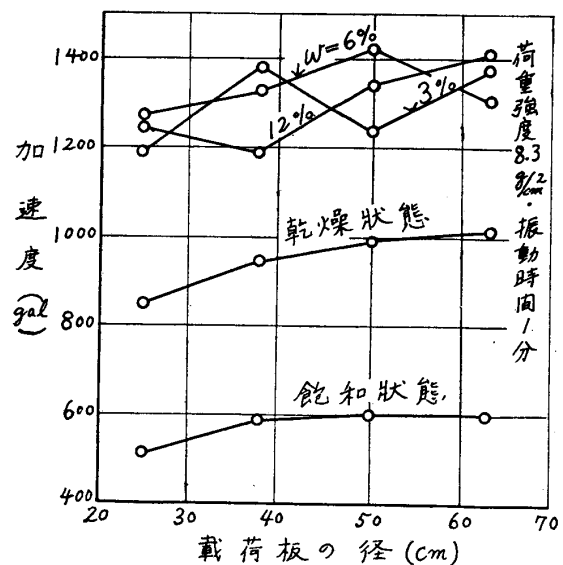


図-6

る。振動時間を略々1分としたときの載荷板の径の影響を示したのが図-6である。径5cmの載荷板を使用すれば載荷面積としては適當のようである。

砂の深さが大きくなるにつれて表面からの液化部分の厚さも大体大きくなるものと思われる。砂箱の側面は透明であるので、これによって観測した流動部分の厚さは乾燥状態と飽和状態とにかかわらず砂の全厚が大きくなるとともに増大した。しかし砂の全厚がある大きくなると液化はある一定の深さ以上には及ばない筈である。その影響をしらべるには砂箱の底圧を測定するのも一方法である。またそれぞれの全厚について、加速度の増大にともなう砂の動きは底圧の測定によって傾向を知ることができる。このため砂箱の中央底部に燐青銅膜による円形受圧板を装置し、その裏面にFD25の歪ゲージ(歪感度 1×10^{-6})を貼附した。これを、新興無線のペン書きの動歪計(DL6)によって各加速度における動歪を測定し圧力強度に換算した。換算は普通行われているように静水圧における歪にもとづいて行った。動歪計の使用は松尾春雄教授の御好意によるものである。

このようにして測定した底圧は加速度の各時期について図-7に示すように静圧力、ゆり込み圧力及び振動圧力の3つに分解できる。ゆり込み圧力とは周知のとおり、

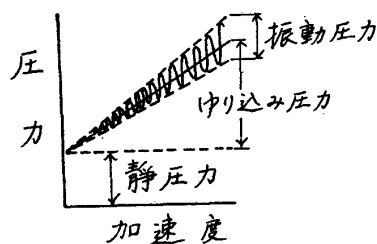


図-7

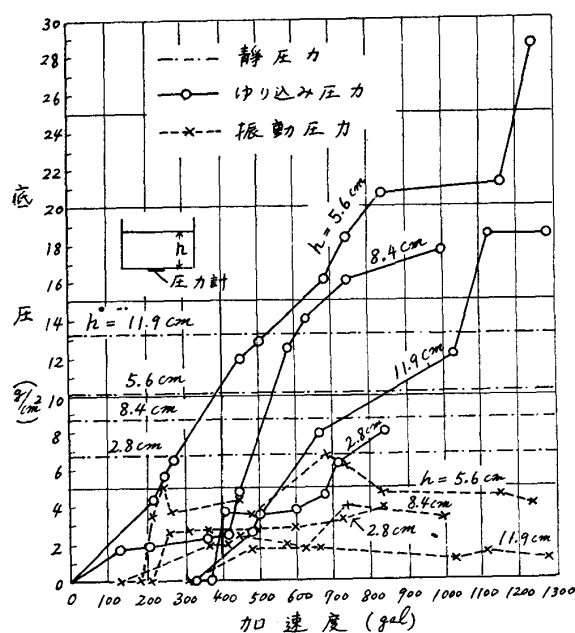


図-8

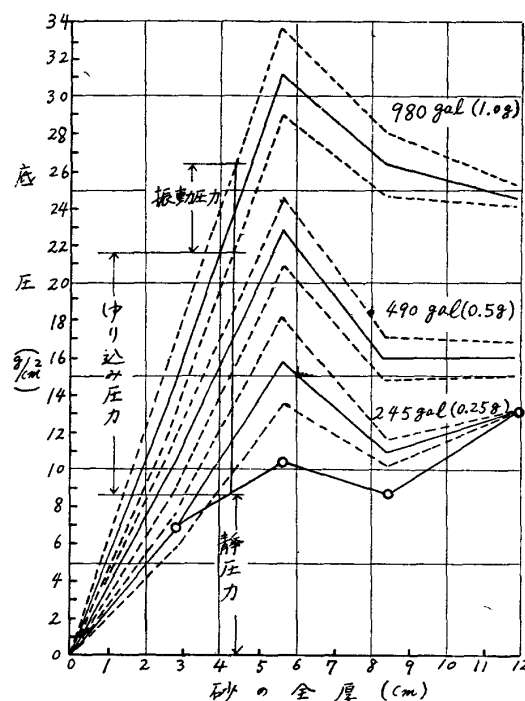


図-9

土圧について松尾教授の名づけられたものである。図-8はそれらの圧力変化を示したもので、このうちゆり込み圧力は加速度の増大にともない略々一方的に増大する。しかし水平振動をうけている砂箱の中央底部において振動圧力があらわれたのは、これを適確に説明することがむづかしく検討を要することである。図-8の結果から砂の全厚に対する同一加速度のもとにおける底圧を図-9のようにしてあらわすと、液化の及ぶ範囲を考えるための参考となる。ゆり込み圧力は表面の自由度に関するものであるから、ある深さまではそれより上の部分の積算となって増大するが、それ以上はゆり込みが及ばなくなるから次第に小さくなる。この砂箱についてゆり込み圧力の最大となるのは5~6cmの深さである。この値は砂箱の規模とくに奥行に対して相対的な関係がありそうである。図-9は松尾教授が示されているように、砂箱による振動時土圧(水平方向)の分布と同じ傾向である。

4. 支持力の測定

砂の各含水比に対する限界支持力は次のようにして求めた。まづ径5cmの載荷板に数種の重量を附加して荷重強度を変え、それぞれの荷重強度について加速度の増大にともなう沈下量をしらべてその関係を図に描く。図-10は乾燥状態と飽和状態の場合のみを示したものである。荷重強度が小さいほど、沈下の状況は局部セン断的となっている。それらの関係曲線について曲率最大の点の加速度に対する支持力をそれぞれの荷重強度とすれば5種類の含水比の砂について図-11のような加速度と支持力の関係曲線が得られる。静止的の支持力は同一径の載荷板を用い、これに載荷してやはり曲率最大の点の荷

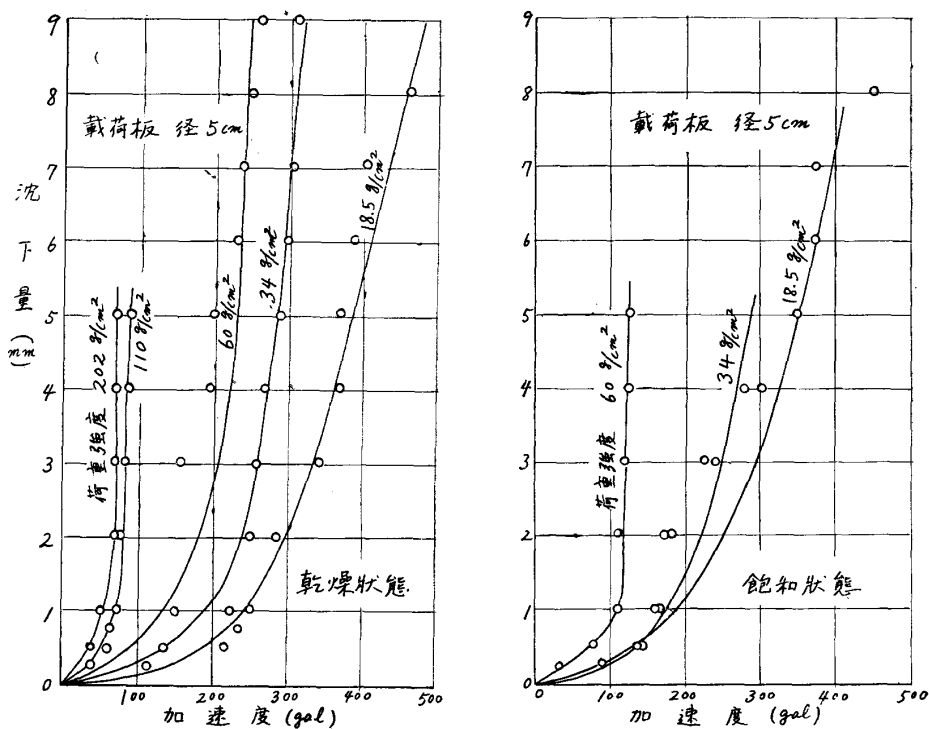


図-10

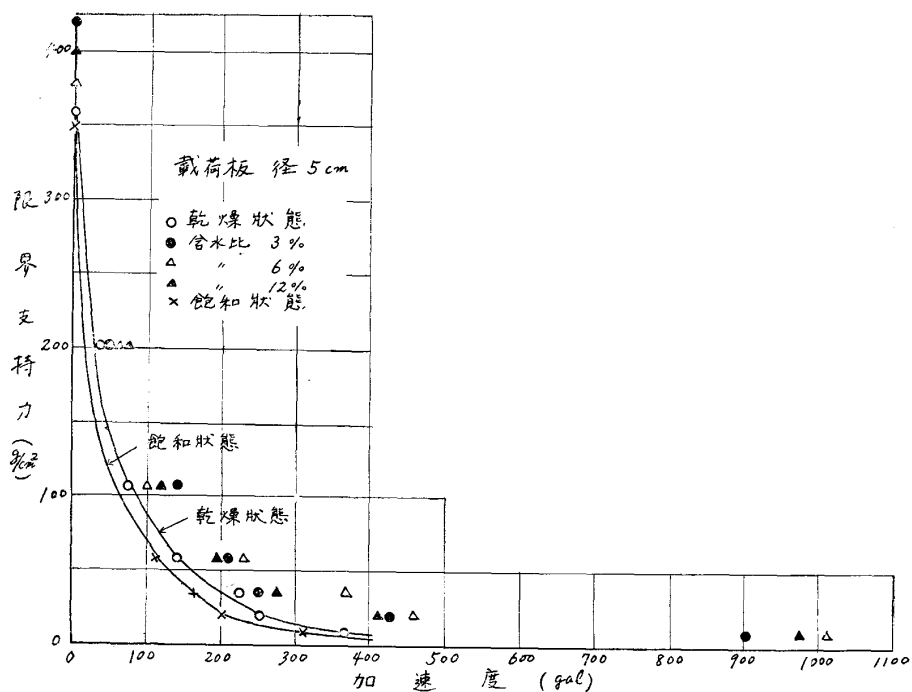


図-11

重強度を支持力とした。図-11 によれば飽和状態のとき支持力は最低であり、次に乾燥状態である。中間の含水比では振動による支持力の低下は最小である。

5. 振動による内部摩擦角の減少

砂の支持力を静的に計算する方法として、図-12 にお

いて帯状荷重の場合に、載荷面下のクサビに働く力の釣り合いから

$$Q = 2P_p + 2BC \tan \phi - \gamma B^2 \tan \phi$$

いま $C=0$

$$\therefore Q = 2P_p - \gamma B^2 \tan \phi$$

$$= 2B\gamma B \times \frac{1}{2} \tan \phi \left(\frac{K_p}{\cos^2 \phi} - 1 \right)$$

但し γ = 土の単位重量

ϕ = 内部摩擦角

K_p = 受働土圧係数

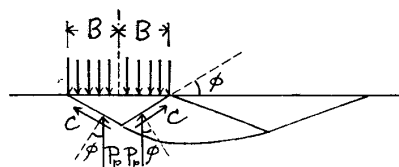


図-12

上式は Terzaghi による支持力公式の1項をなすものである。実験の場合のように、半径 R なる円形載荷板については Terzaghi が行ったように長方形とそれに内接する半円の面積をくらべて係数を変えればよい。

$$Q = 0.6\pi R^2 \times \gamma R \frac{1}{2} \tan\left(\frac{K_p}{\cos^2 \phi} - 1\right)$$

上式においてそれぞれの含水比について前節で求めた支持力を代入し内部摩擦角を求めると、静的に支持力を計算する場合、加速度の大きさに対し内部摩擦角をどのように変えるべきかの指針があたえられる。図-13(a)及び(b)はそれぞれ乾燥状態と飽和状態及び中間の含水比における支持力から逆算した内部摩擦角、佐野博士による内部摩擦角及び実測によって求めた安息角を示したものである。振動中の安息角は写真撮影によって求めた。乾燥状態と飽和状態では支持力から計算して求めた内部摩

擦角と、佐野博士による内部摩擦角とは減少の仕方が加速度の全般にわたってかなりよく似ている。元来安息角と内部摩擦角の値とは一致しないものであるから、2つの曲線の起点の相違はあまり問題とならない。佐野博士の方法は考え方において不合理なものであるが、この2つの内部摩擦角の減少の仕方が類似したことは面白い。内部摩擦角を変える方法としては別に合理性を持ったものが必要であるが、この実験から、砂の液化現象を内部摩擦角で修正し静的に支持力計算をすることがみとめられると思う。とりあえずは佐野博士の方法も乾燥状態及び飽和状態の砂では利用価値があろう。しかし中間の含水比では図-13(b)に示すように事情は大分異ってくる。中間の含水比では砂の液化現象が起りにくく、砂の支持力を内部摩擦角の減少によって一義的に説明できないことを示すものである。振動に対する中間の含水比の砂の挙動は、乾燥状態とは別個に考えなければならないことを示唆している。この外図-13(a), (b)は、いづれの含水比でも安息角は別の傾向のものであることを示している。

6. 結 語

標準砂上に自由に載荷した円形載荷板による毎秒10サイクルまでの、比較的小周期の水平振動の場合の支持力実験から次の結果が得られた。

(1) 乾燥状態及び飽和状態の砂の振動時の支持力は、砂の内部摩擦角を一義的に変えて静的に計算することができそうである。

(2) 中間の含水比では前項のように、砂の内部摩擦角の修正だけで静的に振動時の支持力を計算することは困難と考えられる。中間の含水比では砂の液化現象のみで考えることができないことを示すものであり、乾燥状態及び飽和状態の場合とは取扱いを別にしなければならないであろう。

なお以上の考察は砂上の円板について行った実験にもとづいたものであり、高さのある物体にあっては、水平地震力により物体に作用する力が偏倚することが最も大きな原因となるのであるから、実際の問題ではこれと組合わせて考えねばならないが、本文ではこれについてはふれていない。

この研究は卒業研究として卒業生山本浩三君（現在三菱セメントKK）の協力をうけ、また動歪計の使用について教室松尾博氏の援助をうけた。また松尾春雄教授には御批判を仰ぎ、貴重な御教示を賜ったことを附記して深く謝意を表する次第である。

文 献

1) 岡本舜三：地震時における土の支持力と土圧力について、本誌, Vol. 5, No. 2, P. 8

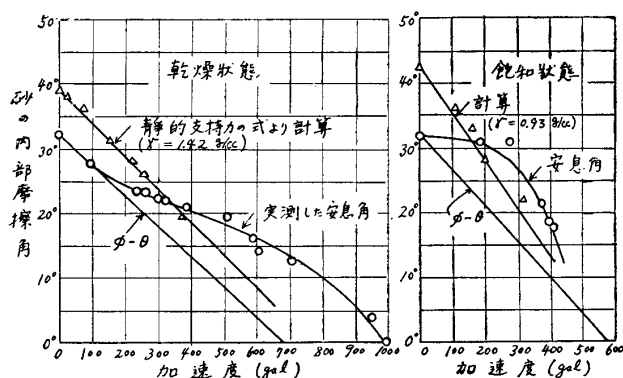


図-13(a)

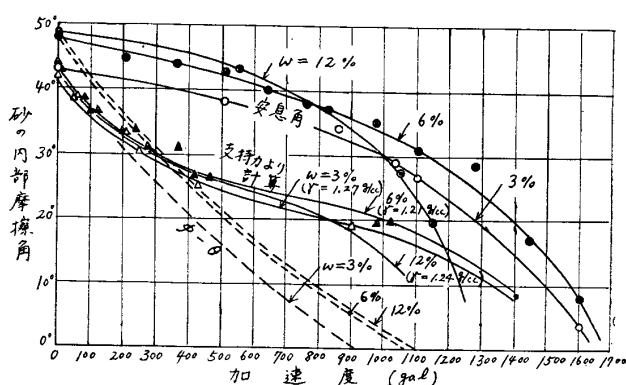


図-13(b)