

粘土中の摩擦ゲイの支持力とその新測定法

正員 村山 朔 郎*
准員 柴田 徹**

THE BEARING CAPACITY OF A FRICTION PILE DRIVEN INTO CLAY AND ITS NEW MEASURING METHOD

By Dr. Eng., Sakurō Murayama, C.E. Member and
Tōru Shibata, C.E. Assoc. Member

Synopsis : This is a report of theoretical and experimental researches on the settlement and bearing capacity of the friction pile driven into a soft clay. In this paper, the authors indicate that the behaviour of friction pile can be solved with the theory deduced from the rheological stand-point, from which a new formula concerning the settlement of friction pile is derived. This formula well agrees with the results of laboratory and full-scale tests. Furthermore, a new measuring method of allowable bearing capacity of the friction pile is proposed and the increase in bearing capacity with time is investigated.

要旨 軟弱粘土層中に打込まれた摩擦ゲイの沈下および支持力特性をレオロジー的考察によつて究明し、降伏支持力の新測定法を提案した。さらにこれら成果を模型実験で検照するとともに現地試験に適用してクイの沈下、支持力特性を明らかにし、またクイ打込み後の時間経過とともに降伏支持力がいかに推移するかを調べた。

1. 緒言

従来、摩擦ゲイの使用された実例は少くないが予期しない沈下や支持力の不足などのため上部構造に障害を与えたものが多いので、一般には特性の不可解な摩擦ゲイの使用は避ける傾向さえもみられる。しかし上部構造の性質にもよるが、軟弱粘土層が深い場合には合理的に使用さえすれば摩擦ゲイでも所期の目的が達せられる場合も少くないと思われる。そのため摩擦ゲイの使用を合理化するためにはその支持力特性および沈下特性を明確にすることがきわめて必要である。そこで本文は深い軟弱粘土層に打込まれた摩擦ゲイの支持力特性をレオロジーの立場から理論的に解明し、ついでその成果を模型ゲイおよび実物ゲイを用いた実験によつて実証するとともに、摩擦ゲイの支持力の測定に関して新たな解析方法を提案したものである。

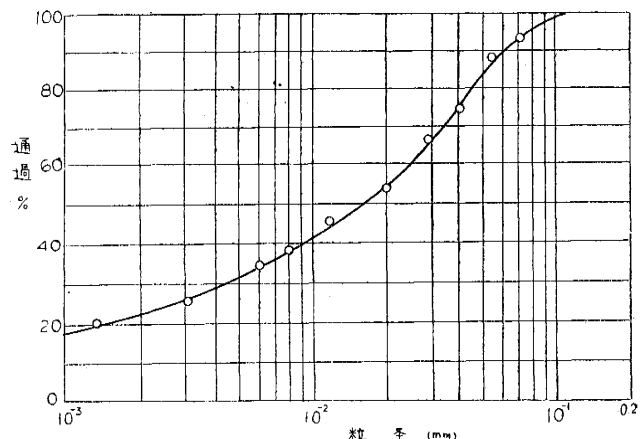
2. 模型ゲイの実験装置と粘土試料

摩擦ゲイに関する各種の実験を行うために、鋼板製円筒型土槽（内径 55 cm、高さ 85 cm）中に粘土を 70 cm 深さに詰め、これを計 5 コ準備した。

粘土は大阪市北区中之島二丁目にて大阪第 1 粘土層より採取したもので、この層は G.L. -8.0~-16.0 m の間にあり、その物性は比重 2.65、単位体積重量 1.703 g/cm³、自然含水比 54.5%、間ゲキ比 1.40、液性限界 54.0%、塑性限界 29.3%、塑性指数 24.7% であり、粒径加積曲線を 図-1 に示す。また乱さない試料の一軸圧縮強度は $q_u = 0.6 \text{ kg/cm}^2$ であり、その圧密試験の結果は 図-2 の通りである。

土槽に粘土を詰めるには採掘時こわされたものをランマーでたたきながら空ゲキの残らぬようにした。このように填充した結果、粘土は完全に乱された状態に近くなる

図-1 粒径加積曲線



* 工学博士、京都大学教授、工学部土木工学教室

**京都大学大学院博士課程学生、同上

ため、填充後約3カ月間静置して強度回復をまつた。その時の強度(粘着力)と経過日数の関係は図-3に示すが、約3カ月経過後の実験の際には強度は $C=0.07 \text{ kg/cm}^2$ 程度を維持し、ほとんど平衡状態を保っているとみられるので、実験結果におよぼす粘土のシキソトロピー的硬化の影響は無視できる。なお強度の測定にはペーン試験機(室内試験用4枚羽根、高さ3.6cm、径2cm)とコーンペネトrometer¹⁾(コーンの底面積 1 in^2 、先端角 30°)を併用した。

摩擦ゲイには真鍮製の円筒形模型ゲイを製作し、そのクイ先は先端角 30° の円錐状とした。クイ径は1, 2, 3, 4 cmの4種類(クイ長はいずれも50cm)を使用し、クイの打込みにはガイド付きの落錘(400g)を20cmの高さよりクイ頭上に自然落させて行つた。打込み時の沈下測定はダイヤルゲージ(1/100mm および 1/500mm)によつた。

3. 打込み抵抗と深さの関係

4種類の径のクイについて打込み深さと1cm貫入に要した落錘の打撃回数(図-4)に示す。この図はいずれのクイも一樣に10cm深さまで静的に貫入させたのち、400gの錘を20cmの高さからクイ頭上に自然落させて40cm深さまで打込んだ際(図-4)の関係である。

軟弱粘土層に打込まれたクイの貫入抵抗はほぼ一定とみてよいといわれているが²⁾、この図によればクイ打ち後しばらくはこの抵抗は直線的に増加し、クイ径の大きいものほどその傾向がいちじるしく、かつ貫入抵抗が一定とみなせるに至る深度(図中○印)は24cm(クイ径1cm)、26cm($\phi 2 \text{ cm}$)、31cm($\phi 3 \text{ cm}$)、35cm($\phi 4 \text{ cm}$)とクイ径の大きいものほど深くなることわかる。

4. 一定荷重を載荷したクイの沈下量と時間の関係

径4cmクイに一定荷重を100分間載荷して沈下量(u_a)~時間(t)関係を観測した。この関係は時間を対数にとると図-5に示すごとく荷重5kg以下では直線関係にあり、しかもその直線の勾配は荷重とともに増加する。荷重が5kgをこえるとその勾配は急激に大きくなり、上方に凹の曲線となつて相当時間経過後に破壊にいたることを暗示している。従つて摩擦ゲイの沈下現象は粘土のクリープに起因する現象と考えられる。この考察に基づき、図-5の直線の勾配と荷重の関係をプロットして図-6を求めるとこの図はいわゆる流動曲線であつてこの曲線の折点として上限降伏値(5kg)が、またこの曲線の横軸の交点として下限降伏値(0.2kg)が明瞭にあらわれている。

さきに村山・柴田³⁾は粘土の力学的挙動をレオロジーの立場から考察した結果、粘土の上限降伏値(σ_u)は粘土にクリープ破壊をおこす応力の最低の限界応力であることを明らかにした。すなわち σ_u 以下の応力では粘土のクリープは相当時間経過後進行を停止して粘土は破壊にいたらないが、 σ_u 以上の応力ではクリープが徐々に加速されてついに破壊にいたる。また下限降伏値(σ_0)は粘土の固有内部抵抗に相当する応力で、粘土にクリープ変形を生じさせない最大の限界応力と定義した。

図-2 圧密試験結果

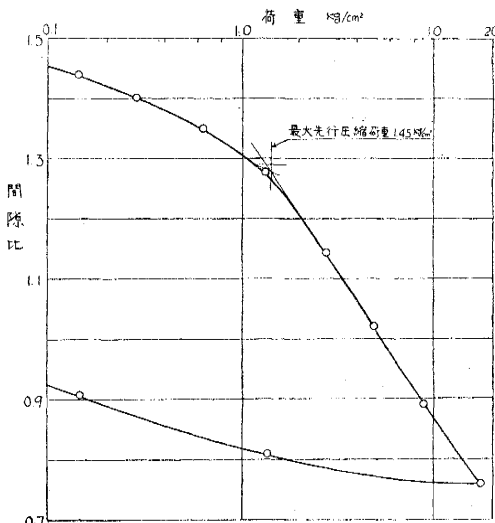


図-3 粘土の強度回復曲線

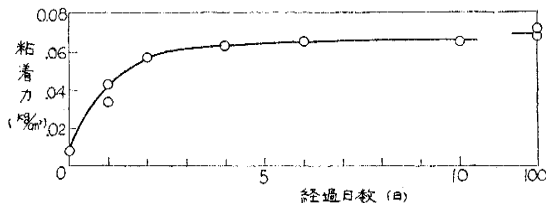


図-4 貫入抵抗と深さの関係

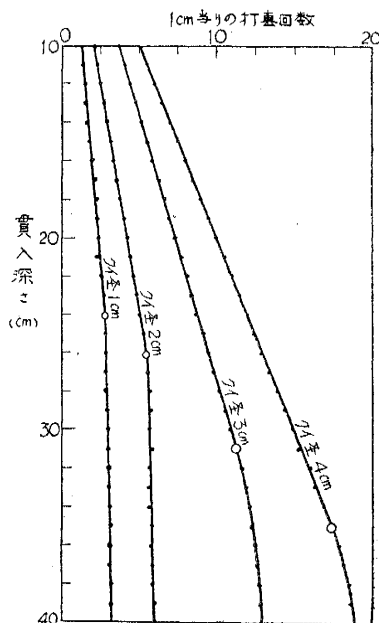


図-5 沈下～時間(対数)曲線

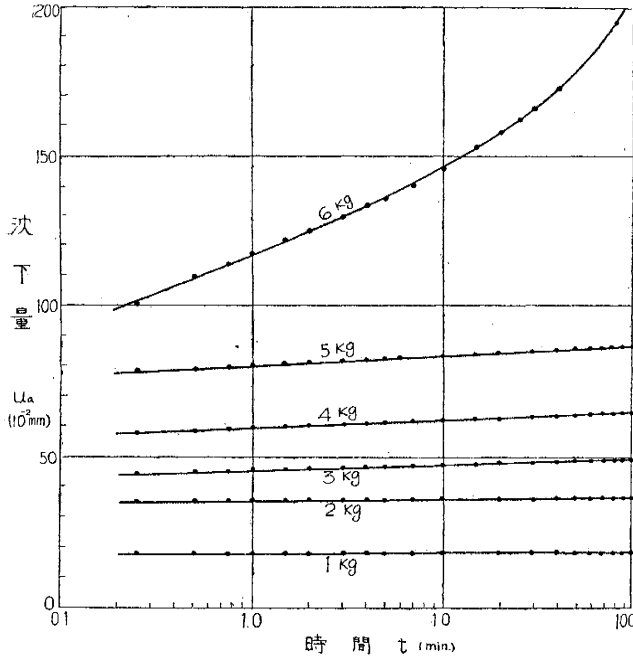
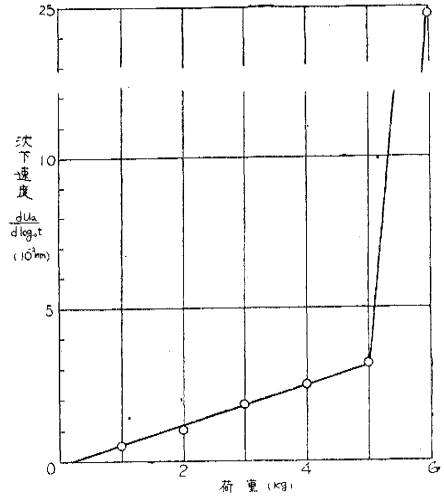


図-6 沈下速度～荷重曲線



粘土の上限降伏値が粘土を破壊させる持続性荷重の中の最小のもので、従つて粘土の最大許容応力となるのと同様にクイの一定荷重載荷試験の際に観察されるこのような上限降伏値はクイの最大許容支持力すなわち降伏支持力を与えるものといふことができる。

次に一定荷重載荷時におけるクイの沈下の経時特性に関して理論的考察を試みる。

軟弱な粘土層中に打込まれた摩擦グイでは先端抵抗は周面摩擦に比べ無視できる位小さいといわれている²⁾のでここでは先端抵抗を無視して周面摩擦のみについて考察する。

せん断ヒズミ(γ)と応力(τ)の関係は上限降伏値以下の応力範囲では著者らの前報した圧縮クリープの際の関係³⁾を応用して次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1} + \frac{(\tau - \tau_0)}{G_2} + \frac{(\sigma - \sigma_0)}{B_2 G_2} \log A_2' B_2 G_2 t \quad \dots (1)$$

ここに、 τ_0 : 下限降伏値、 G_1, G_2 : セン断弾性係数、 A_2', B_2 : レオロジー的常数、 t : 時間である。

図-7において u を鉛直方向変位、 r をクイ中心からの水平方向半径とすれば、

$$\gamma = \frac{du}{dr} \quad \dots (2)$$

クイ頭に荷重が載荷されたために、半径 r の点の粘土中に生じるせん断応力は⁴⁾

$$\tau = -\tau_a \left(\frac{a}{r} \right) \quad \dots (3)$$

ここに、 τ_a : クイ周面に下向きに作用するせん断応力、 a : クイの半径である。

また図-7に示した影響半径 b は式(3)の関係より

$$b \geq a \left(\frac{\tau_a}{\tau_0} \right)$$

にて与えられる。

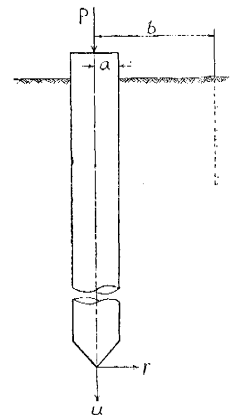
式(1)に式(2)、(3)を代入して、

$$\frac{du}{dr} = -\frac{\tau_a}{G_1} \frac{a}{r} - \left(\frac{a \tau_a}{r} - \tau_0 \right) \left(\frac{1}{G_2} + \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2' B_2 G_2 t \right) \quad \dots (4)$$

式(4)を積分して u を求めると

$$u = -\frac{\tau_a}{G_1} a \log r - (a \tau_a \log r - r \tau_0) \left(\frac{1}{G_2} + \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2' B_2 G_2 t \right) + C \quad \dots (5)$$

図-7



$r=b$ にて $u=0$ の条件より積分常数 C を定めると

$$C = \frac{\tau_a}{G_1} a \log b + (a \tau_a \log b - b \tau_0) \left(\frac{1}{G_2} + \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2' B_2 G_2 t \right)$$

ゆえに式(5)は

$$u = \frac{a \tau_a}{G_1} \log \frac{b}{r} + \left\{ a \tau_a \log \frac{b}{r} - \tau_0 (b-r) \right\} \left(\frac{1}{G_2} + \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2' B_2 G_2 t \right) \dots \dots \dots (6)$$

となるからクイの沈下量 u_a は

$$u_a = \frac{a \tau_a}{G_1} \log \frac{b}{a} + \left\{ a \tau_a \log \frac{b}{a} - \tau_0 (b-a) \right\} \left(\frac{1}{G_2} + \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2' B_2 G_2 t \right) \dots \dots \dots (7)$$

にて表わされる。

さらに周面のせん断応力 τ_a は

$$\tau_a = \frac{P}{2 \pi a l}$$

ここに P ; 載荷荷重, l ; クイの打込み深さである。

従つて式(7)は

$$u_a = \frac{P}{2 \pi l G_1} \log \frac{b}{a} + \left\{ \frac{P}{2 \pi l} \log \frac{b}{a} - \tau_0 (b-a) \right\} \left(\frac{1}{G_2} + \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2' B_2 G_2 t \right) \dots \dots \dots (8)$$

となり, クイに一定荷重を載荷した場合には沈下量~時間(対数)関係が直線になることを説明できる。

また式(8)より直線の勾配を求めると

$$\frac{du_a}{d \log t} = \frac{P}{2 \pi l B_2 G_2} \log \frac{b}{a} - \frac{\tau_0}{B_2 G_2} (b-a) \dots \dots \dots (9)$$

となり 図-6の実験における上限降伏値以下の荷重範囲の挙動を理論的に完全に説明することができる。

5. 漸増荷重によるクイの載荷試験

前述の4種類のクイ径をもつ単ゲイの載荷試験を行った。載荷は荷重制御方式とし, 一定荷重を等時間隔に段階的に増加していく場合を行い, その平均載荷速度を変えた場合についても検討した。

5.に述べたごとくクイの沈下特性は粘土の圧縮クリープ特性に類似しており, また著者らの前報³⁾により粘土の上限降伏値は応力~ヒズミの関係を両対数紙上にプロットし, その直線の第1折点に対応する応力として求めることができる。従つてクイの場合も同様の方法で荷重~沈下曲線を両対数紙上にプロットし, 直線の第1折点に対応する荷重として降伏支持力を求めることができるはずである。

図-8は荷重~沈下曲線, 図-9はその関係を両対数紙上にプロットしたものであつて, 図-9に示した直線の第1折点に対応する荷重は一例としてクイ径4cmの場合に図-6の流動曲線から求めた上限降伏値(5kg)と一致していることから明らかなようにレオロジー的に重要な意味をもつた降伏支持力である。この方法で求めた降伏支持力の意義は, クイの沈下が時間とともに進行してついに破壊的沈下を生じるか, あるいは沈下の進行が停止して永久に構造物の安全が保証できるかの限界値としての特性を有することである。

図-9にはクイ径4cmの場合にのみ載

図-8 荷重~沈下曲線

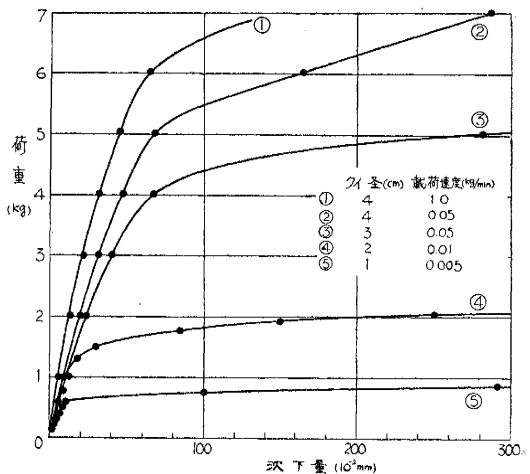
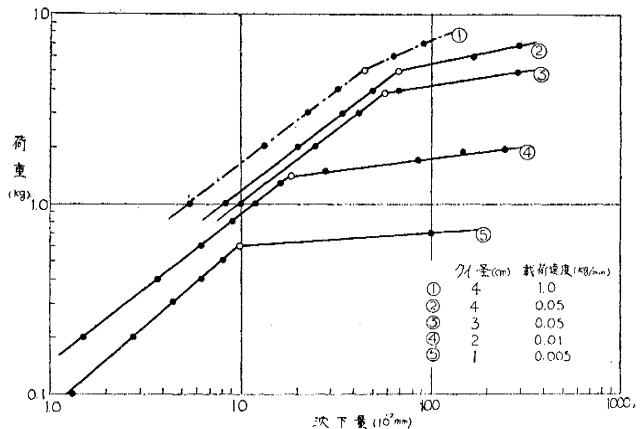


図-9 荷重~沈下曲線(両対数)



荷速度を2種類 (1 kg/min, 0.05 kg/min) に変えた結果をあわせ記入してあるが降伏支持力はともに 5 kg となつて载荷速度による影響をうけないことがわかり、载荷試験を実施する上に好都合となる。

次に降伏支持力と最終打込み時貫入深さ 1 cm 当りの落錘打撃回数との関係をプロットすると 図-10 が得られ、両者の関係はほぼ直線とみなせることから、 P_y を降伏支持力 (kg), s を最終打込み時の貫入量 (cm) とすれば、

$$P_y = C \cdot \frac{1}{s} \quad (C: \text{const})$$

が成立し、この場合には、

$$P_y \cdot s = \frac{1}{30} W \cdot H$$

ここに W ; 錘重量 (0.4 kg), H ; 錘の落下高 (20 cm) が得られ、($P_y \cdot s$) は錘の位置エネルギーに比例する。

6. 現地試験

クイの沈下と支持力特性に関する理論および模型実験の成果を実際に適用するために、軟弱粘土層中に打込まれた摩擦グイについて現地試験を実施した。試験場所は大阪市大淀区中津本通一丁目、その土質構成は 図-11 に示すごとく地表から約 5 m 深さまで緩い締り程度の砂礫層があり、それ以下に厚さ約 15 m の粘性土が堆積している。従つてこの地点では粘性土のみでなく表層の砂による周面摩擦が同時に働らくものと考えられるが、前述したクイの支持力解析法は、別途実験により砂の場合にも適用できることがわかつている。この地点の粘性土の物理・力学試験の結果は 図-11 に併記してあるが一軸圧縮強度は $q_u = 0.6 \text{ kg/cm}^2$ となつている。図-11 の右端欄はクイを 25 cm 貫入に要した打撃数 (クイ打撃機は油谷式 2 号の複働汽錘を用いた) と深度との関係を示した抵抗線図であつてクイ先きが粘性土に達すると 3. に述べたように貫入抵抗はほぼ一定とみてよい。

試験グイは外径 35 cm, 自重 1.2 ton の鉄筋コンクリートグイであつて、これを地表面下 7.5 m および 9.0 m の深さまで打込んだ際の沈下特性、支持力特性を明らかにするとともに支持力の回復現象をも調べた。クイ先き深さを上記の 2 種類に変えた試験地点は水平距離にして約 300 m 離れているが土質調査の結果はいずれも 図-11 の土質柱状図に示したものと差異のないことがわかつている。

クイの载荷試験は油圧ジャッキによる荷重をほぼ等時間隔にクイ頭に载荷し、沈下量の測定は試験グイ周にとりつけた 4 コのダイヤルゲージ (1/100 mm) の読みを平均した。

6.1 クイ先き深さ 9 m の場合

クイの载荷試験 (No. 1, No. 2) の結果を 図-12, 13 に示す。試験 No. 2 は試験 No. 1 実施日より 2 週間経過後に行つたもので、荷重～沈下曲線から極限支持力は 50 ton→60 ton に増加していることがわかる。しかし許容支持力を荷重～沈下曲線から求める従来の諸方法は完全率のとり方にも左右され、力学的な意味をもつたものとはいえない。

図-14, 15 は载荷荷重をパラメータとして沈下～時間 (対数) 関係をプロットしたもので模型実験より得た 図-5 に対応している。これらの図にはある荷重 (試験 No. 1; 35 ton, 試験 No. 2; 40 ton) 以下では直線関係が得られ、その直線の勾配は荷重に比例して増加するという式 (8) の沈下特性が明瞭に現われている。いまこの直線の勾配 (荷重が大きくなつて上方に凹の曲線となる範囲では 1'~10' 間の接線勾配) を荷重に対してプロットすると 図-16 となり、この沈下速度～荷重曲線は 図-6 と同様に式 (9) によつて説明できる。従つて 図-16 より粘土の上限降伏値に相当するクイの降伏支持力を求めるとそれぞれ試験 No. 1; 38 ton, 試験 No. 2; 47 ton

図-10 降伏支持力～打止め時の打撃回数関係

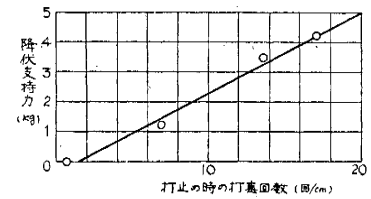


図-11 土質柱状図

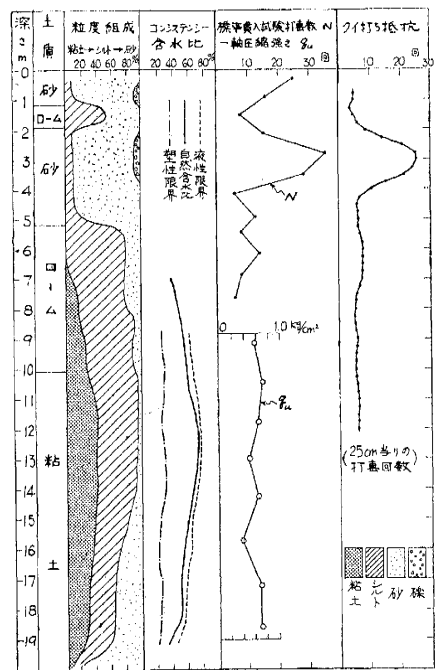


図-12 クイの載荷試験結果(No. 1)

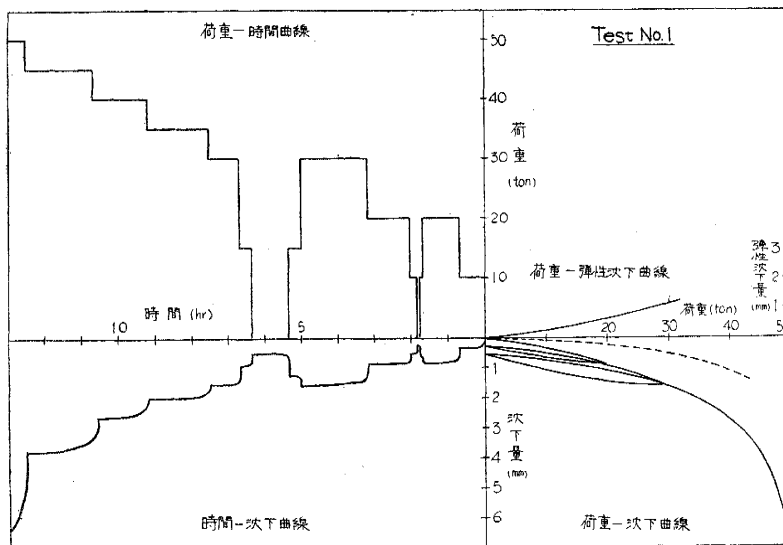
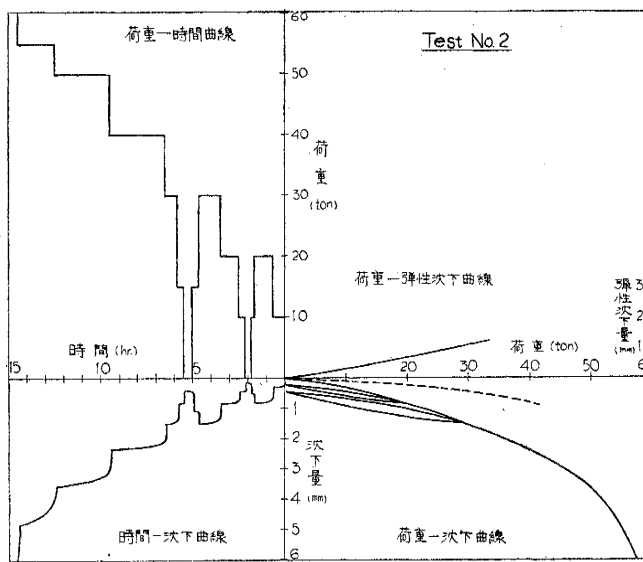


図-13 クイの載荷試験結果(No. 2)



となる。

これらの載荷試験は図-12, 13の荷重～時間関係図にみられるごとく正確に等荷重を等時間隔に増加してはいないが平均載荷速度 0.1 ton/min の荷重制御方式とみなして差し支えないので、5. に述べた方法で荷重～沈下曲線を両対数紙上にプロットすると図-17 が得られる。この図において直線の第1折点に対応する荷重として降伏支持力を求めると試験 No. 1; 38 ton, 試験 No. 2; 47 ton となり、図-16 から求めた値と一致している。

6.2 クイ先き深さ 7.5 m の場合

地表から 7.5 m の深さまでクイを打込んだ後1日, 4日, 17日, 35日間経過後にクイの載荷試験を行って支持力の推移を調べた。その平均載荷速度は 0.1 ton/min の荷重制御方式であつて、得られた荷重～沈下曲線を図-18 にまとめて示す。この図から、経過日数が多くなるほど極限支持力および直線の第1折点に対応する降伏支持力は増加することがわかる。いま降伏支持力の推移を経過日数に対してプロットすると図-19 に示すごとく図-3 の強度回復曲線と類似の曲線が得られる。なお図-19 において経過日数1～4日の間を点線で示した訳は、この期間内に試験グイの周囲に群グイが打込まれたため上部砂層の締め固め効果がクイの支持力に影響をおよぼしてい

図-14 沈下～時間 (対数) 曲線 (No. 1)

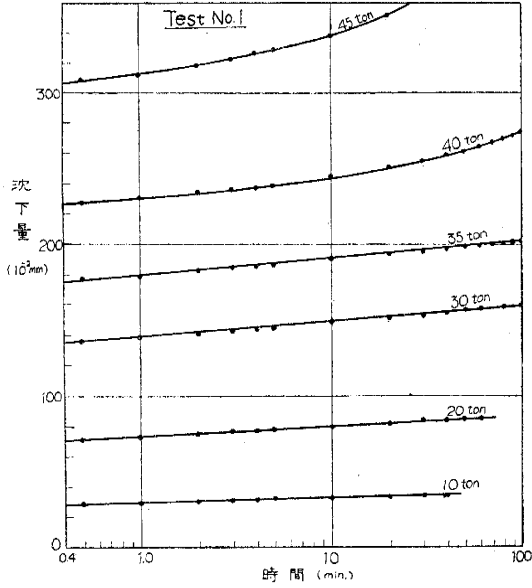


図-15 沈下～時間 (対数) 曲線 (No. 2)

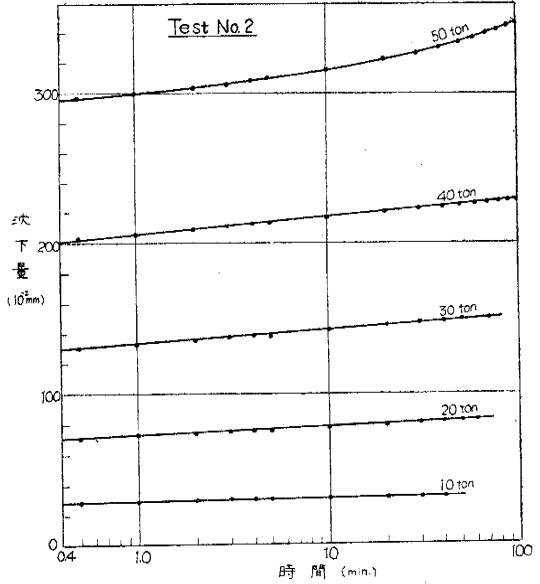


図-16 沈下速度～荷重曲線

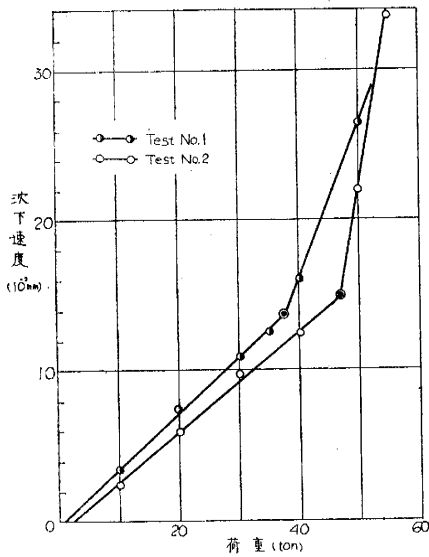


図-17 荷重～沈下曲線 (両対数)

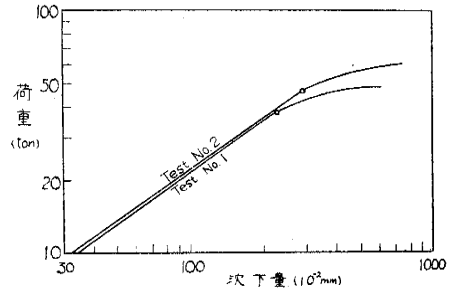


図-18 荷重～沈下曲線 (両対数)

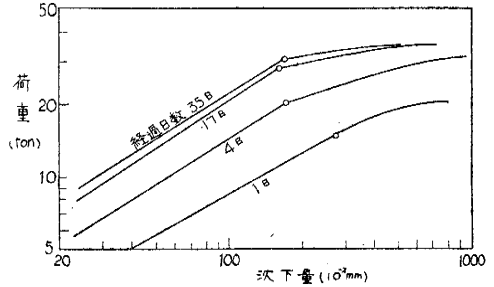
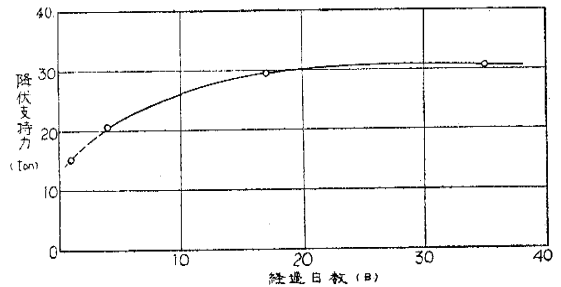


図-19 降伏支持力の推移曲線



ると考えられたからである。

本節では現地における摩擦グイの載荷試験の結果、グイの沈下、支持力特性に関する理論と模型実験の成果が実際に適用できることを明らかにした。

7. 結 論

深い軟弱粘土層に打込まれた摩擦グイの沈下、支持力特性をレオロジーの立場から理論的に解明し、ついでその成果を模型グイおよび実物グイを用いた実験によつて実証するとともに摩擦グイの

支持力の測定に関して新たな解析方法を提案したが、得られた主な結論は次のようである。

(1) 一定荷重を載荷して得たクイの沈下～時間関係は時間を対数にとると粘土の上限降伏値に相当する降伏支持力以下の荷重では直線となり、その勾配は荷重に比例して増加する。またこの降伏支持力以上の荷重範囲では上方に凹の曲線となり、相当時間経過後に破壊的沈下を生じることを暗示する。

(2) 新たに提案したレオロジー的な意味をもつ降伏支持力は、一定荷重を等時隔に段階的に増加していく荷重制御方式で得られる荷重～沈下曲線を両対数紙上にプロットし、直線の第1折点に対応する荷重として求めることができる。

(3) 降伏支持力は載荷速度による影響を受けないとみてよい。

(4) 模型実験によれば、降伏支持力値と最終打込み時の貫入量との積は落錘の位置エネルギーに比例する。

(5) 降伏支持力のクイ打込み後の推移は粘土の強度回復特性と類似の傾向を示す。

粘土層中の摩擦グイの支持力特性にはなお多くがあり、例えばクイの打込みによる周囲粘土層の圧密が、長期降伏支持力におよぼす効果等の問題が残されている。

終りにではあるが本研究は昭和32年度建設技術研究補助金によるものの一部であり、現地試験については京阪神急行電鉄 KK 鈴木祥六郎氏の、また模型実験については京大大学院学生逸見隆二君の協力を得た。ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 室町忠彦：粘性土におけるコーンの貫入抵抗と一軸圧縮強度との関係，土木学会誌，42 卷 10 号，1957，pp. 7-12
- 2) K. Terzaghi and R.B. Peck: *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, 1948, pp. 461-463
- 3) 村山朗郎，柴田 徹：粘土のレオロジー的特性について，土木学会論文集，40 号，1956
S. Murayama and T. Shibata: *On the Rheological Characters of Clay—Part I*, Disaster Prevention Inst. Bulletin No. 26, 1958
- 4) W.W. Pendleton: *The Penetrometer Method for Determining the Flow Properties of High Viscosity Fluids*, J. App Phys. 14, 1943, pp. 170-180

(昭. 33. 3. 10)