

クイに作用する *Negative friction* についての実験的研究

大原 資生*・山本 哲朗*・田崎 佳夫**

Experimental Studies on Negative Friction

Sukeo O-HARA, Tetsuro YAMAMOTO and Yoshio TAZAKI

Abstract

In order to estimate the negative friction of pile, the experiments on two kinds of model pile were performed using the consolidation test apparatus. Fig. 2 and Fig. 3 show the experimental apparatus. The model piles are a polyvinyl chloride pipe and a mortar bar, 3.2 cm in diameter.

The relations between negative friction and consolidation stress are obtained by measurement of the point resistance. From these results, we obtain the fact that the application of Broms's equation for the calculation of the negative friction is most adequate.

1. 緒 言

軟弱地盤に設けられたクイ基礎には地盤沈下に伴って *Negative friction* (以下 *N. F* という) が作用するが、この大きさを予測するのが重要な問題である。

一般に、*NF* は地盤の沈下とともに増大するのが普通であるから、*NF* によってクイに作用する軸力の変動や最大値を知るには現場での長期観測実験が必要である。

本論文は実験的に *NF* の大きさを測定するため、圧密試験機を改良し、模型粘土層を圧密沈下させ、粘土層の中央に設置した模型クイに生じる軸力を測定する実験を行なった結果および方法についてのべたものである。

NF の算定方法は、すでにいくつか発表^{1),2),3)} されているが、本研究では *NF* の実験値と計算値との対比を行った。また、地盤の沈下速度および沈下量、クイの材質などが *NF* の発生にどのように影響するかを検討した。

2. *NF* の発生機構

地盤の沈下に伴って、クイに作用する *NF* の発生

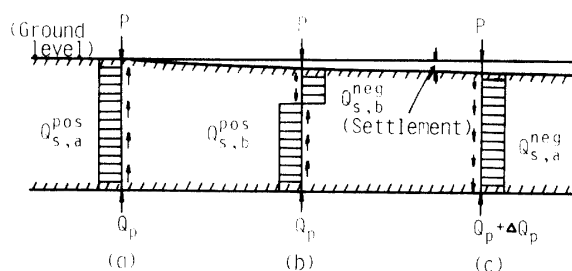


Fig. 1 Negative friction mechanism.

機構は Fig. 1 のように考えられる。

Fig. 1(a) は、地盤沈下が生じていない状態でのクイに作用している力の釣合いを示している。クイ頭には長期荷重 P が作用し、クイ先端では支持力 Q_p が作用している。また、クイ周囲には上向きの正の周面まきつ力が作用している。

次に、時間の経過に伴ない地盤沈下が進むにつれて地盤の上部より徐々に *NF* が発生し、周面まきつ力の分布は Fig. 1(b) のようになる。*NF* と正の周面まきつ力の変化点が中立点でクイの軸方向変位が周囲の地盤の変位と等しい点で、この点は地盤沈下の進行につれて次第に下ってきて最終的には Fig. 1(c) の状態となる。この状態では *NF* に相当する ΔQ_p がクイ先端に発生することになる。また、クイ先端が岩盤に達しているような状態では中立点はクイの先端に近い点となり、クイの全長にわたって *NF* が作用することになる。

* 土木工学科

** 九州電力(株)

すなわち Fig. 1(c) の状態である。

いま、一般的な状態として Fig. 1(b) の状態を考えてクイに作用する力の釣合を考える。

クイ頭に作用する荷重を P 、浮力を差し引いたクイの自重を W 、中立点より上の部分に作用する NF の合力および下の部分に作用する周面まきつ合力をそれぞれ Q_{NF} 、 Q_{PF} とし、先端支持力を Q_p とすると、クイの釣合式は次のように表される。

$$P + W + Q_{NF} = Q_{PF} + Q_p \quad (1)$$

一般には、クイの自重は無視されるから $W=0$ 、また、今回の実験では、クイ頭には荷重は作用していないから $P=0$ である。クイ先端の沈下はほとんどないと考えられるので、正の周面まきつ力は生じないから $Q_{PF}=0$ である。よって、(1) 式は次のようになる。

$$Q_{NF} = Q_p \quad (2)$$

したがって、クイ先端反力を測定すれば NF が求まることになる。

3. 実験装置

今回の実験装置を Fig. 2 に示す。この装置は、通常用いている圧密試験機の載荷装置を利用し、圧密容器を Fig. 2 のようにしたものである。

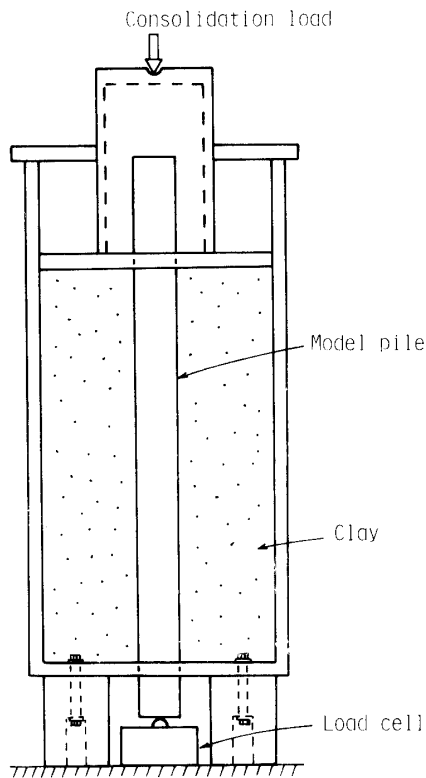


Fig. 2 Outline of experimental apparatus.

圧密容器は内径 151 mm のアクリライト円筒で、その中心に直径 32 mm の模型グイが置かれている。

底板および載荷板は圧密円筒の内部にはまる型でおかれ、その中心部には直径 33 mm の穴があって、クイの上端、下端がはまる形になっている。

底板および載荷板には、放射状に径 1 mm の小孔があけてあって、両者の間におかれる粘土層は両面透水型の圧密をうけることになる。

底板は下台におかれているが、圧密円筒は圧密試験機の浮動リング型の圧密リングと同じように浮いた状態でセットされる。これは圧密円筒の内径に対し、粘

Table 1 Model pile

Type of model pile	Polyvinyl chloride pipe	Mortar bar
Outer diam. (mm)	32	31
Thickness (mm)	3.6	—
Effective length (mm)	371	372
Young modulus (kg/cm ²)	2.46×10^4	2.00×10^5

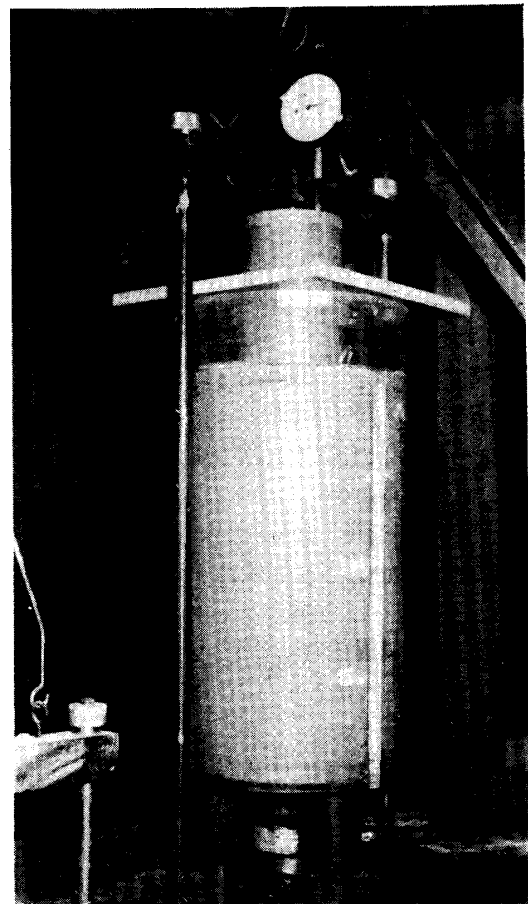


Fig. 3 Experimental apparatus.

土層の厚さが約2倍となるので、圧密圧が圧密円筒で支えられるのをできるだけ防止するためである。

実験に用いられたクイの種類などは Table 1 に示す。

なお、圧密荷重は Fig. 2 の矢印の位置にスチールボールを介して加えられる。模型グイの下端と下台の間には容量 50 kg/cm^2 のヒズミゲージ型のロードセルがおかれ、クイに作用する NF が測定できるようにになっている。Fig. 3 は装置の写真である。

4. 試料および実験方法

実験に用いた試料は、 420μ フルイを通過した粉末粘土で、その物理的性質を Table 2 に、粒度曲線を Fig. 4 に示す。

Table 2 Physical properties of clay

Specific gravity	2.67
Liquid limit (%)	65.1
Plastic limit (%)	28.1
Plasticity index	37.0

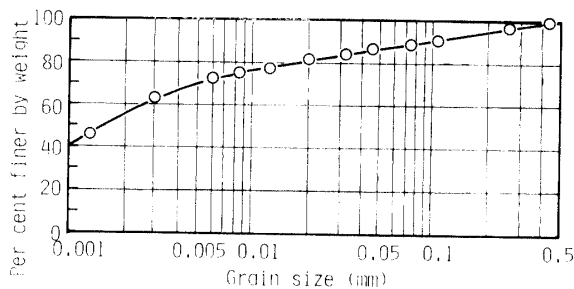


Fig. 4 Grain size distribution curve of clay.

この粘土に、含水比が60%前後になるように脱気水を加え、十分に練りかえた後、含水比が変化しないようにビニール膜でおおって一昼夜放置する。

一方、模型グイを圧密円筒の中に立てこんでおき、底板と圧密円筒の底面が一致するように支持板で圧密円筒をとめておく。また、このときに NF 測定用のロードセルを所定の位置に設置しておく。

次に、上述の方法で準備した粘土を、ゆっくりと圧密円筒の中に4層に分けて詰め、所定の厚さの粘土層を作製する。層厚はほぼ 27 cm である。なお、各層の間には圧密円筒の前面に沿って粉末状のカオリン粘土を入れ、粘土層の沈下量を測定するようにした。

その後、圧密円筒をとめた支持板を取り除き、圧密円筒を自由な状態とし、載荷板、圧密円筒および粘土

の自重による沈下が落ち着くまで放置する。

以上のようにして作製された粘土層の上面に、所定の圧密荷重を加え、時間の経過による粘土層の沈下量およびクイの先端反力の増加量を測定した。

粘土層上面の沈下量は、載荷板の移動量をダイヤルゲージで測定し、粘土層内の沈下は前述のカオリン粘土の移動量によって測定した。

圧密荷重強度としては 0.008 kg/cm^2 , 0.017 kg/cm^2 , 0.033 kg/cm^2 , 0.050 kg/cm^2 の4種類を用いた。

Fig. 5 は圧密円筒に詰められた粘土の正規の圧密試験の結果を示すもので、圧密圧力 0.050 kg/cm^2 のときの体積圧縮係数 $m_v = 1.02 \text{ cm}^2/\text{kg}$ 、圧密係数 $c_v = 2.07 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$ 、透水係数 $k = 2.10 \times 10^{-5} \text{ cm/min}$ といった値が得られている。

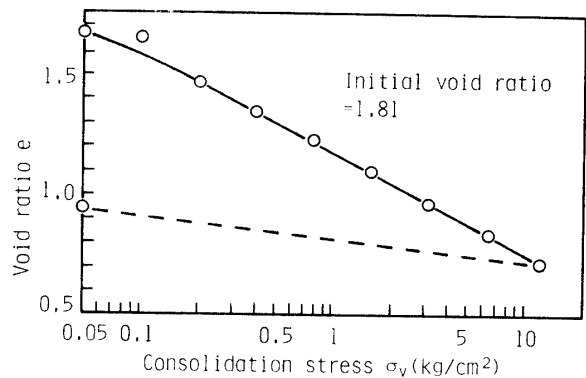


Fig. 5 Void ratio-consolidation stress curve.

5. 実験結果および考察

Fig. 6 は、 NF 測定実験時における粘土層の沈下量分布の一例を示したもので、載荷後24時間の値である。圧密理論から地盤沈下量分布の状況は排水条件のちがいでよって Fig. 7 のようになることがわかっているが、本実験では、前述のように両面排水であるので Fig. 7(b) のような沈下量分布が得られることが予想されるが、Fig. 6 の実験値もほぼ近い形のものとなっている。ただ、前述の m_v , c_v などを用いての沈下量の計算値が実験値の $1/2$ 程度となることに疑問が残った。

ここで、以下の計算を簡単にするために、粘土層の沈下量分布を Fig. 6 の破線で示されるような三角形分布と仮定する。

したがって、地盤中の深さ x での沈下量 δ_{rx} は次式により求まる。

$$\delta_{rx} = \frac{\delta_{r0}}{l} \times (l - x) \quad (3)$$

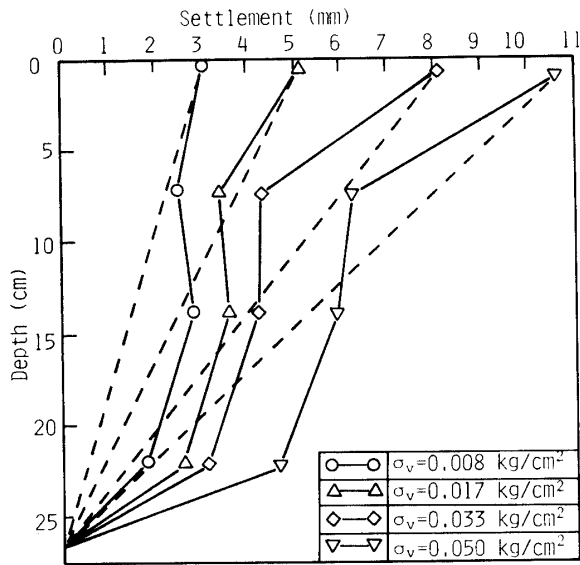


Fig. 6 Distribution of settlement of clay.

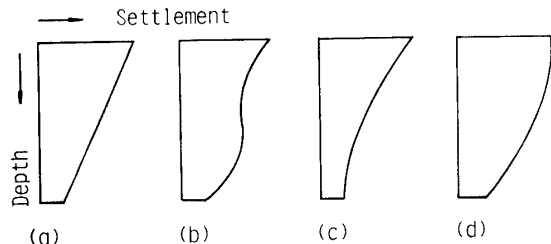


Fig. 7 Types of consolidation settlement of ground.
 (a): Uniform settlement. (b): Drainage from both upper and lower boundaries. (c): Drainage from upper boundary. (d): Drainage from lower boundary.

ここで δ_{s0} : 地盤表面沈下量
 l : 粘土層厚さ
 x : 粘土層表面からの深さ

クイの変位とその周辺粘土層の沈下との差、すなわちクイと地盤との相対変位 δ_r は (4) 式で示される。

$$\delta_r = \delta_1 + \delta_2 - \delta_3 \quad (4)$$

ここで δ_1 : クイの弾性圧縮量
 δ_2 : クイ先端の地盤への貫入量
 δ_3 : 周辺地盤の沈下量

δ_r が正のときクイに NF が作用することになる。

本実験では、クイ頭部には荷重は作用していないし、クイ先端はロードセルで支持されている状態であるので、 δ_1 および δ_2 は微小であるので、これを無視すると地盤沈下量が相対変位に等しくなる。

$$\delta_r = \delta_3 \quad (5)$$

Fig. 8(a) (b) はそれぞれ塩ビ管の模型グイ、モル
 Vol. 31 No. 1 (1980)

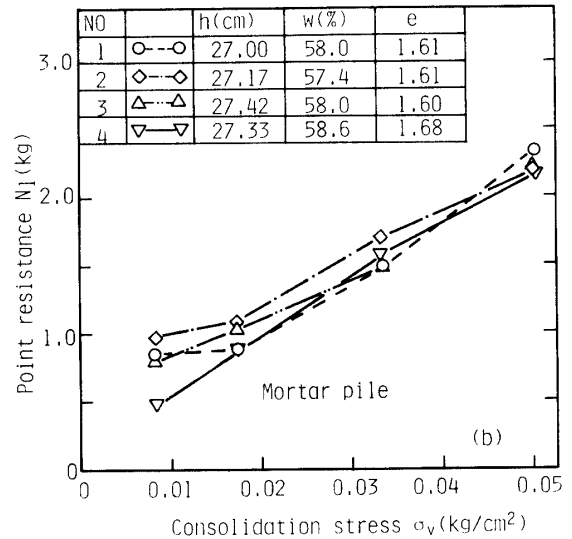
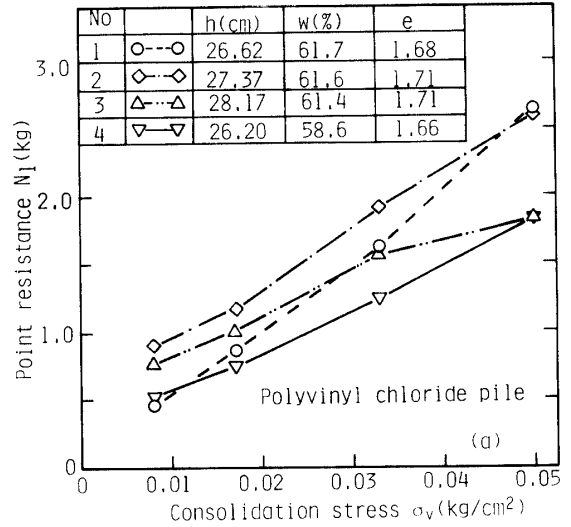


Fig. 8 Relationship between point resistance and consolidation stress.

タル模型グイについての実験結果で、圧密荷重強度とクイの先端反力との関係を示したものである。

なお、測定値は載荷後24時間の値である。図中の番号は実験番号を、 h は粘土層厚、 w は含水比、 e は初期間げき比を示す。

前述のことから先端反力が NF となる。

Fig. 8 から圧密圧力とクイ先端反力との関係はほぼ直線であることがわかる。すなわち圧密圧力の増加にともない先端反力も増加し、その増加率はほぼ一定である。今回の実験では、最大圧密圧力が 0.050 kg/cm^2 と非常に小さい場合であるが、クイの周面まさつ力が極限まさつ力より小さい範囲では、このような傾向が見られると考えられる。

また、模型グイの材料のちがいによるクイ先端反力

の差を比較すると、塩ビ管グイもモルタルグイもほとんどちがいないことがわかる。これは塩ビ管グイとモルタルグイの粘土に対する付着力、換言すればまさつ抵抗がほとんど同じであるということを示している。

Fig. 9 は圧密圧力に対するクイ先端反力の割合と圧密圧力との関係を示す。

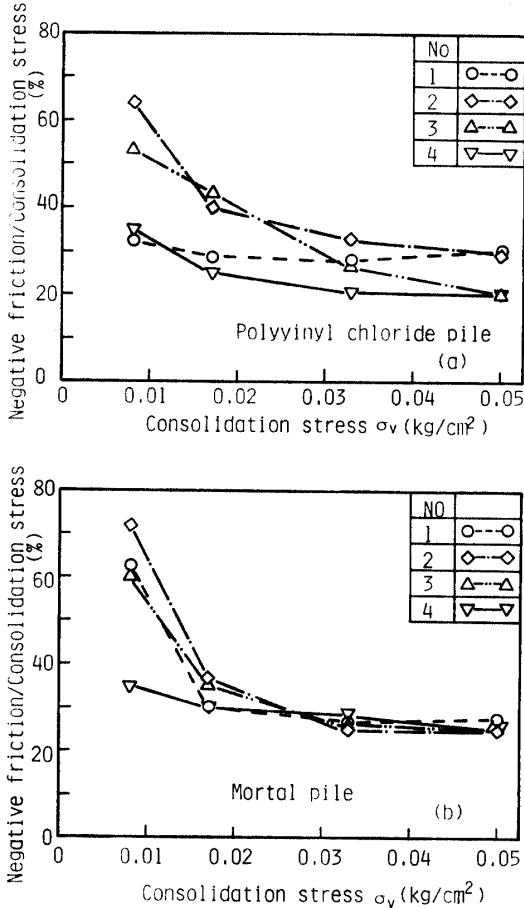


Fig. 9 Ratio negative friction to consolidation stress at each consolidation stress.

この結果から圧密圧力がもっとも小さい 0.008 kg/cm^2 の場合が、圧密圧力に対する N_f の割合が大きく、その他の圧密圧力に対しては約30%前後とほぼ一定となっている点は興味深い。この原因としては圧密圧力 0.008 kg/cm^2 の最初の圧密圧力を載荷する段階では粘土層の自重圧密が完全に終了していないことが考えられる。

Fig. 10 はクイ先端反力 N_i と粘土層表面の沈下量 δ_{s0} との関係を示した一例である。この図は各圧密荷重強度段階ごとに描いたものであり、前の荷重段階での載荷後24時間における値が次の荷重段階の初期値となる形でプロットしてある。

N_i と δ_{s0} との間には、いづれの荷重段階において

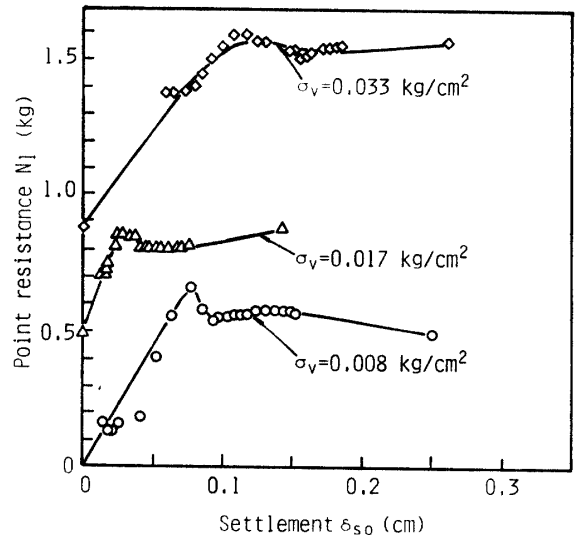


Fig. 10 Relationship between point resistance and settlement of clay.

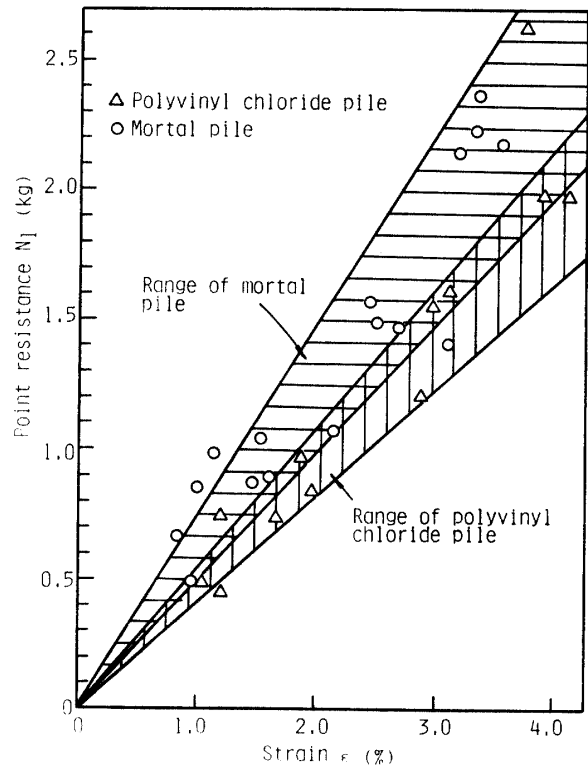


Fig. 11 Relationship between point resistance and strain of clay.

もほぼ弾塑性的な関係が見られる。

クイ先端反力 N_i と粘土層のひずみ ϵ との関係を Fig. 11 に示す。ひずみ ϵ は次式によって与えられる。

$$\epsilon = \delta_{s0} / l \quad (6)$$

δ_{s0} および N_i は載荷後24時間の値であり、粘土層厚 l は各々載荷前の値をとったものである。

Table 3 Comparison experimental values with calculated values by Broms's equation

$\sigma'_v(\text{kg/cm}^2)$	$f_s=(0.20\sim 0.25)\sigma'_v$	Experimental Values(kg/cm ²)	
		Polyvinyl chloride pile	Mortal pile
0.008	$1.6\times 10^{-3}\sim 2.0\times 10^{-3}$	$1.75\times 10^{-3}\sim 3.2\times 10^{-3}$	$1.80\times 10^{-3}\sim 3.67\times 10^{-3}$
0.017	3.4 " ~ 4.25 "	2.8 " ~ 4.24 "	3.25 " ~ 4.04 "
0.033	6.6 " ~ 8.25 "	4.63 " ~ 6.94 "	5.07 " ~ 5.91 "
0.050	10.0 " ~ 12.5 "	6.55 " ~ 10.10 "	8.14 " ~ 9.09 "

この図より、それぞれのクイに対する N_t と ε との関係を示すと次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{塩ビ管グイ} : N_t=5.0\times 10^{-1}\varepsilon\sim 7.5\times 10^{-1}\varepsilon \\ \text{モルタルグイ} : N_t=4.0\times 10^{-1}\varepsilon\sim 5.5\times 10^{-1}\varepsilon \end{array} \right\} (7)$$

上記の式を示す範囲を Fig. 11 の中に示した。

6. 実験結果と計算式との比較

NF の計算式にはいくつかの提案式が挙げられる。

この中にはクイと地盤との間の相対変位速度によって、クイの周面まきつを求めるという方法^{(1),(2),(3)}がある。

しかし、この方法による場合にはスベリ係数を求めることが必要であるが、この値を実験的に求めるのにかなりむづかしい。本実験においても、一面せん断試験機を利用してこの値を求めることをこころみだが、信頼できる値をうるに至らなかった。

そこで、ここでは NF の計算式でもっとも簡単で、しかも比較的よい結果を与えるといわれている *B. B. Broms* の式⁽⁴⁾による計算結果との比較を行ってみた。

(8) 式が *Broms* の式である。

$$f_s=\sigma'_v K \tan \phi'_a=\beta\sigma'_v \quad (8)$$

ここで $\beta=K \cdot \tan \phi'_a$

K : 横方向土圧係数

σ'_v : 有効上載圧

ϕ'_a : クイ表面と土との有効まきつ角

f_s : 負のまきつ力

β の値として *Garlanger* は粘土について $0.20\sim 0.25$ を与えている。上式によって計算した結果を実験値と比較したのが、Table 3 である。

ここでは圧密圧力を σ'_v としている点が問題となるが、計算値と実験値とはかなりよい一致をみている

といえよう。

7. 結 語

クイに作用する負のまきつ力 (N, F) について、圧密試験機の載荷装置を利用して圧密容器内に作られた粘土層に圧密圧力を加え、その中心に設けられた模型グイに生じる先端反力を測定するという方法で、 NF の大きさを知るための実験を行った。そして、その結果を *Broms* の式の計算値と比較した。

本実験で明らかとなったことをまとめると、次のとおりである。

- (1). NF によって生じるクイ先端反力と圧密圧力はほぼ一次比例の関係にある。
- (2). 圧密圧力に対する NF の大きさの割合は、クイの材質に無関係に約30%前後である。
- (3). クイ先端反力と粘土層表面の沈下量との間にはほぼ弾塑性関係がある。
- (4). NF の計算式と実験値とを対比して検討した結果、*B. B. Broms* の式がよい一致を示すことがわかった。

参 考 文 献

- 1) M. Sawaguchi: Approximate Calculation of Negative Skine Friction of a Pile, *Soils and Foundation*, **11**, No. 3, 31-49 (1971)
- 2) 佐藤 悟: ネガティブ・フリクションの発生機構に関する研究, *土木技術*, **29**, No. 7-No. 9 (1974)
- 3) 吉田常松, 青木健三, 戸井田浩: ネガティブ・フリクションの近似計算法, *土木技術*, **32**, No. 9 (1977)
- 4) 岸田英明: 杭に作用する負の摩擦力 (*B. B. Broms* による) 土と基礎, **28**, 31-34 (1980)

(昭和 55 年 4 月 15 日 受理)