

榑武智工務所 ○ 稲 国芳
東京工業大学 岸田 英明

【1】はじめに

杭は常に一定の荷重を支えていれば良いというわけではない。陸上構造物の杭は、地震¹⁾、風²⁾などの作用による繰返し荷重を受けるし、海洋構造物の杭では波浪力^{3) 4) 5)}による繰返し荷重が主要な外力となっている。近年その合理性が再評価されつつある摩擦杭は、各研究機関において調査、研究が鋭意進められ、長期的な挙動は明らかにされつつある。今後摩擦杭が積極的に採用されるためには、上記の繰返し荷重時の挙動が明確にされる必要がある。

図-1は一定軸荷重(Q_{ave})と、それに重ね合わされた繰返し軸荷重($\pm Q_{amp}$)を受ける粘土中の摩擦単杭を表している。杭に作用する繰返し軸荷重の形態は、一定軸荷重(Q_{ave})と繰返し軸荷重振幅(Q_{amp})の相対的な大きさにより、一方向載荷($Q_{ave} > Q_{amp}$)と二方向載荷($Q_{ave} < Q_{amp}$)に分類できるが、本報告は一方向の繰返し軸荷重を受ける粘土中の摩擦杭について考察したものである。

粘土中の摩擦杭に一方向の規則的な繰返し軸荷重が作用すると、変位振幅は一定に保たれたまま、塑性変位(平均変位)が累積する。塑性変位の累積の割合は繰返し回数と共にしだいに減少していくが、破壊に至る場合には、変位振幅は一定のまま推移するものの、この塑性変位の増大による破壊モードとなる(図-2)。このような杭の変形挙動は、現場実験^{3) 4) 5)}や模型実験⁶⁾において観察されており、一方向の繰返し軸荷重を受ける杭の挙動を支配する塑性変位の累積機構の解明が重要と思われる。しかしながら、繰返し載荷に伴う杭の塑性変位応答は、一定荷重(Q_{ave})、荷重振幅($\pm Q_{amp}$)、周期(T)、繰返し回数(N)、荷重波形等の要因によって様々に変化することが認められている。さらに重要な要因としては、杭を支える地盤の力学的特性があげられる。

地盤材料としての粘土の力学的特性は、その顕著な時間依存性挙動⁷⁾で特徴づけられる。すなわち、粘土の非排水強度が載荷速度によって変化することは、粘土が時間依存性を示す一つの事象である。また、粘土に一定の応力を作用させると変形は時間とともに増大するが、これはクリープ変形として知られている。さらに、通常の試験から求められたせん断強度よりも低いせん断応力のもとで試料が破壊に至る現象(クリープ破壊)の存在も明らかにされてきた。このような粘土の時間依存性挙動に関する研究は古くか

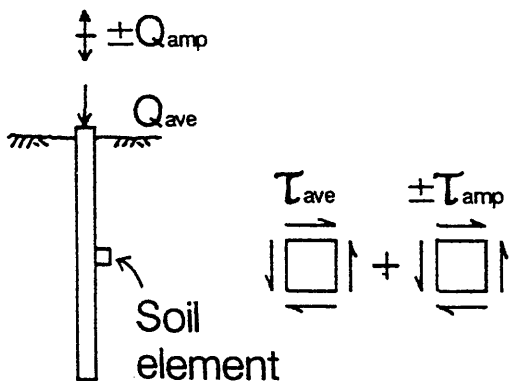


図-1 繰返し軸荷重を受ける粘土中の摩擦杭

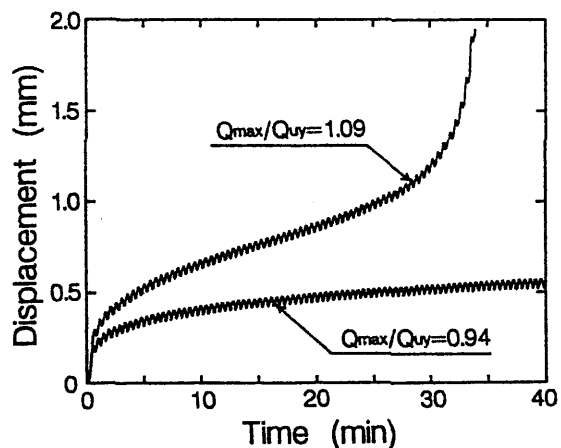


図-2 一方向の規則的な繰返し軸荷重を受ける粘土中の摩擦杭の変位～時間の関係⁶⁾

表-1 模型地盤の物理的性質

土粒子比重	G _s	2.68
液性限界	W _L	64.9 (%)
塑性限界	W _P	28.9 (%)
塑性指数	I _P	36.0
粒度組成	砂分	32.3 (%)
	シルト分	26.4 (%)
	粘土分	41.3 (%)

表-2 クリープパラメーター

A	3.03×10^{-5}	(mm/sec)
α	0.315	(1/kgf)
m	0.65	

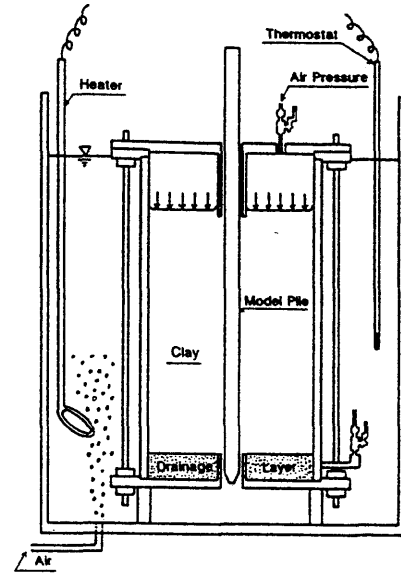


図-3 実験土槽

ら精力的に行なわれてきており、これらの研究成果の一部は粘土中の摩擦杭の載荷試験結果の解釈および支持力決定に用いられている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

一方、Hyde & Brown¹¹⁾、Hyde & Ward¹²⁾は、粘性土のクリープ特性と繰返しせん断特性の類似性に着目し、粘性土の繰返し挙動予測に、Singh & Mitchellのクリープ関数¹³⁾を応用できることを見出している。同様に、松井ら¹⁴⁾もクリープ関数¹³⁾を応用することにより、繰返し応力を受ける粘土の挙動とクリープ挙動との間の類似点を指摘し、さらに両者の本質的な機構が同じである可能性を示唆している。

本研究は、上述の粘性土のクリープ挙動と繰返しせん断挙動の類似性に注目し、一方向の規則的な繰返し軸荷重を受ける粘土中の模型摩擦杭の塑性変位の予測を試みたものである。繰返し載荷試験に先立ち、4種類の荷重レベルで一定荷重(クリープ)載荷試験を行ない、得られた荷重～変位～時間の結果をもとに、杭～地盤系のクリープパラメーターを求めている。次に、繰返し試験の変動荷重を一連のクリープ荷重の集合と仮定し、静的な等価荷重を算出している。繰返し載荷に伴う杭の塑性変位は、その静的な等価荷重のクリープ変位の経時変化として与えられている。

なお、本報告における一定荷重載荷試験および一方向繰返し載荷試験は、それぞれ破壊に至らない荷重範囲内で行なわれた実験である。

【2】実験概要

実験に用いた試料は豊浦砂を加えた川崎粘土である。表-1にその物理的性質を示す。充分攪拌、脱気したこの試料を、あらかじめ水で満たされた実験土槽(図-3)に、空気を混入しないよう静かに投入した。所定量の試料を投入した後、剛な加圧板で7日間予備圧密(圧密圧力 0.23kgf/cm²)を行なった。その後、加圧装置をドーナツ状のゴム膜に取り替え、さらに14日間本圧密(圧密圧力 0.70kgf/cm²)を行なった。所定の日数終了後、閉ざされていた上下の杭の貫入孔の栓を取外し、30mm/minの速度で杭を押込んだ。貫入に伴って発生する過剰間隙水圧の消散¹⁵⁾および地盤の安定を待ち、実験は杭貫入から3日後に行なった。

実験土槽(図-3)は内径240mm、有効深さは374mmである。土槽内面には圧密促進のため濾紙を張り付けてある。土槽底面から杭を突出させることにより、杭の先端抵抗は生じないように工夫されている。模型杭(φ19mm)の表面は砕いた豊浦砂を薄く張り付け、充分粗くしてある。粘土のクリープ挙動は温度の影響¹⁶⁾を受けるので、実験土槽を恒温水槽に浸し、予備圧密から実験過程を通じ、温度を25℃±0.5に保った。

杭の載荷は空圧式繰返し載荷方式¹⁷⁾で行なった。一定荷重(クリープ)載荷試験および一方向繰返し載荷試験ともレギュレーターの操作により、一定時間で所定の荷重レベルまで速やかに載荷した後、それぞ

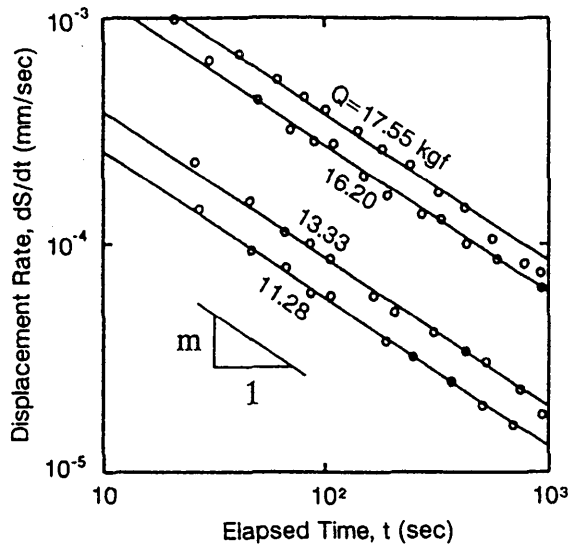


図-4 杭頭変位速度と経過時間の関係

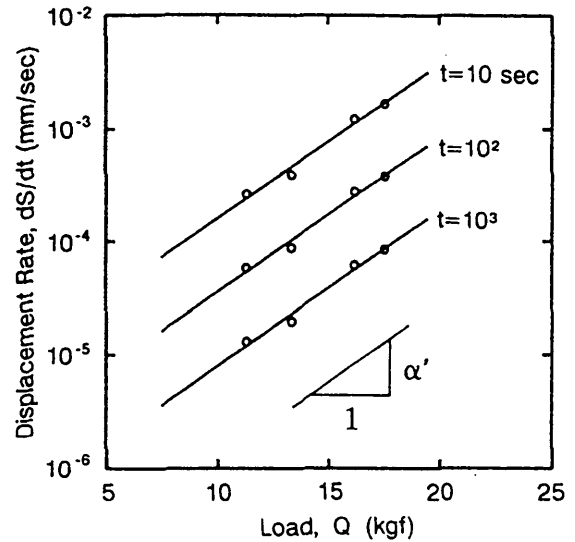


図-5 杭頭変位速度と荷重の関係

れ一定荷重を保持、もしくは繰返し荷重を加えた。

【3】クリープパラメーター

図-4は一定荷重(クリープ)载荷過程の杭頭変位速度(dS/dt)の対数を縦軸に、経過時間(t)の対数を横軸にとった変位速度と時間の関係を示している。変位速度の対数は時間の対数に逆比例して減少し、荷重の大きさにかかわらずその逆比例係数 m は一定である。図-5は杭頭変位速度(dS/dt)の対数を縦軸に、载荷荷重(Q)を横軸にとった変位速度と荷重の関係を示している。図-5からわかるように、荷重が大きくなると変位速度も大きくなるが、その勾配 α' は経過時間に関係なく一定となっている。

Singh & Mitchell¹³⁾は三軸圧縮試験機による数多くのクリープ試験結果の解析をもとに、軸ひずみ速度($d\varepsilon/dt$)、主応力差(D)、および経過時間(t)の間に次式が成立することを見出した。

$$d\varepsilon/dt = A \cdot \exp(\alpha \cdot D) \cdot (t_1/t)^m \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 ε は軸ひずみ、 t_1 は単位時間、 A と α と m は材料定数である。Singh & Mitchell¹³⁾によれば、(1)式は通常の試験から求められるせん断強度の30~90%の範囲における、種々の土の非排水および排水条件下のクリープ挙動をうまく説明しうるとのことである。

軸方向荷重が作用した場合の剛な摩擦杭の変位が周辺地盤のせん断変形に基づくものであるならば、応力(D)を杭頭荷重(Q)に、軸ひずみ(ε)を杭頭変位(S)に置き換えることにより、上記のクリープ関数を粘土中の摩擦杭のクリープ挙動予測に適用できよう。したがって、

$$dS/dt = A \cdot \exp(\alpha \cdot Q) \cdot (t_1/t)^m \quad \text{----- (2)}$$

用いられている3つのパラメーター(A , α , m)の定義は、(2)式を以下のように書き直すことで理解できる。

$$\ln(dS/dt) = \ln(A) + \alpha \cdot Q + m \cdot \ln(t_1) - m \cdot \ln(t) \quad \text{----- (3)}$$

すなわち、 $-m$ はある値 Q における $\ln(dS/dt) \sim \ln(t)$ 関係(図-4)の傾きである。また α はある一定の時間 t における $\ln(dS/dt) \sim Q$ 関係の傾きを表しており、 α' が $\log(dS/dt) \sim Q$ 関係(図-5)の傾きなら、 $\alpha = \ln 10 \times \alpha'$ である。 A は $\ln(dS/dt) \sim Q$ 関係における切片を表しており、 $t=t_1$, $Q=0$ における仮想変位速度である。 m と α の両者は時間と荷重レベルによらず一定と仮定されている。したがって、(2)式は $m=\text{const.}$, $\alpha=\text{const.}$ の条件を満足する荷重レベルにおいてのみ成立することに注意しなければならない。本報告はこの条件を満足する荷重範囲内に関する考察である。得られた杭~地盤系のクリープパラメーターを表-2に示す。

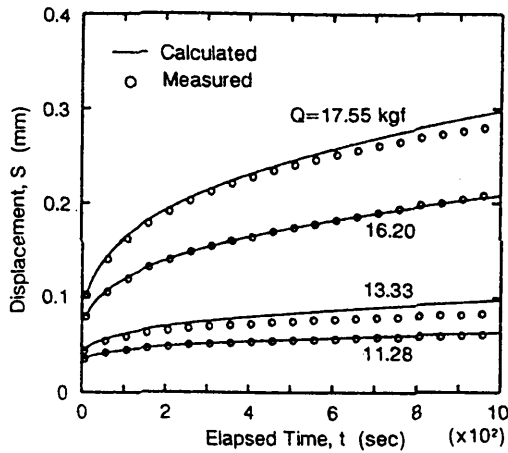


図-6 実測値と計算値の比較
(一定荷重載荷試験)

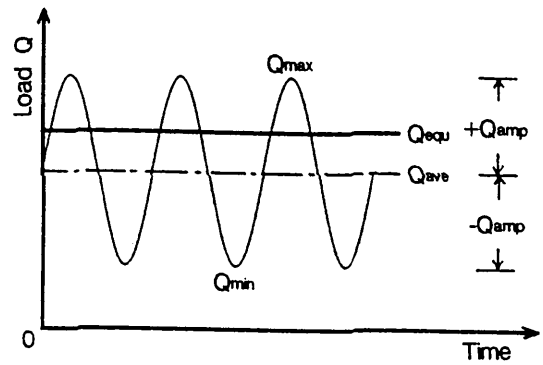


図-7 規則的な変動荷重と等価荷重 ($Q_{e,qu}$)

(2)式を積分することにより、変位と時間の関係式を求めることができる¹³⁾。すなわち、

$$S = A \cdot \exp(\alpha \cdot Q) \cdot t_1 \cdot \ln(t) + \text{Constant} \quad (\text{for } n=1) \quad \text{----- (4)}$$

$$S = A \cdot \exp(\alpha \cdot Q) \cdot (t_1)^m \cdot (1/(1-n)) \cdot t^{1-n} + \text{Constant} \quad (\text{for } n \neq 1) \quad \text{----- (5)}$$

$n=1$ の場合の(4)式は、変位が時間の対数に対して直線的に増加する場合(対数クリープ)を示しており、村山・柴田モデル⁹⁾が表現されている。一方、(5)式は変位が時間とともに指数的变化する場合で、指数クリープとよばれる¹⁸⁾。

得られた3つのパラメーター(表-2)を(5)式に代入し、各荷重に対する変位と時間の関係を計算すると、図-6の実線で示されるような曲線群が得られる。なお、(5)式の積分定数は一番目の測定点の変位と時間を与えることで求められた。図-6において計算値と実測値を比較すれば、両者はほぼ一致している。したがって、このような方法によって比較的広範な荷重に対する粘土中の摩擦杭のクリープ(塑性)変位の経時変化を近似的に求めることができる。

【4】規則的な変動荷重と静的な等価荷重

冒頭で示したように、粘土中の摩擦杭に一方方向の規則的な繰返し軸荷重が作用すると、変位振幅は一定に保たれたまま、塑性変位が累積する。したがって、ここでは規則的な変動荷重の作用により累積する塑性変位の変位速度と等しい速度効果をもたらす一定荷重、すなわち静的な等価荷重($Q_{e,qu}$)の存在を仮定する(図-7)。仮定された等価荷重の塑性変位速度は(2)式より、以下のようなになる。

$$dS/dt_{(e,qu)} = A \cdot \exp(\alpha \cdot Q_{e,qu}) \cdot (t_1/t)^m \quad \text{----- (6)}$$

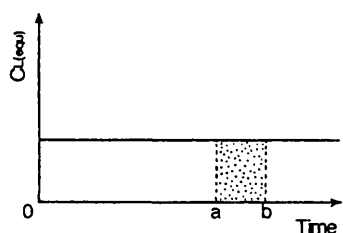
ここで、 A は $t=t_1$ および $Q_{e,qu}=0$ における仮想変位速度である。塑性変位速度($dS/dt_{(e,qu)}$)は、荷重値に依存する荷重係数($C_L = \exp(\alpha \cdot Q_{e,qu})$)、および時間経過により変化する時間係数($C_T = (t_1/t)^m$)の2つの係数をこの仮想変位速度(A)に乗じたものである。

一方、一方方向の規則的な変動荷重($Q(t)$:ここではサイン波を考える)を一連のクリープ荷重の集合とみなし、一定荷重に対して用いられる(2)式をこの変動荷重に対しても適用可能であると仮定すると、変動荷重時の塑性変位速度は次式のように得られる。

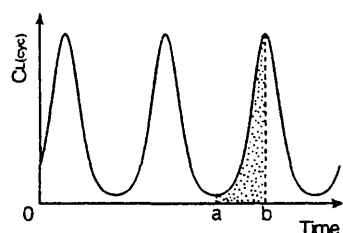
$$\begin{aligned} dS/dt_{(cyc)} &= A \cdot \exp(\alpha \cdot Q(t)) \cdot (t_1/t)^m \\ &= A \cdot \exp(\alpha \cdot (Q_{ave} + Q_{amp} \cdot \sin(2\pi t/T))) \cdot (t_1/t)^m \end{aligned} \quad \text{----- (7)}$$

$$\text{ここで、} \quad Q(t) = Q_{ave} + Q_{amp} \cdot \sin(2\pi t/T) \quad \text{----- (8)}$$

T : 周期 t : 経過時間



(1)等価荷重



(2)変動荷重

表-3 一方向の規則的な繰返し載荷における等価荷重

波 形	等価荷重 $Q_{equ} = Q_{ave} + \frac{1}{\alpha} \ln(\lambda)$
サイン波	$\lambda_{(sin)} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(\alpha \cdot Q_{amp} \cdot \sin(x)) \cdot dx$
三角波	$\lambda_{(tri)} = \frac{\sinh(\alpha \cdot Q_{amp})}{\alpha \cdot Q_{amp}}$
矩形波	$\lambda_{(rec)} = \cosh(\alpha \cdot Q_{amp})$
ただし、 $Q_{ave} = (Q_{max} + Q_{min})/2$ $Q_{amp} = (Q_{max} - Q_{min})/2$ $Q_{max} \geq Q_{min} > 0$, α :クリープパラメーター	

図-8 荷重係数と時間の関係

Q_{ave} : 一定荷重 (= $(Q_{max} + Q_{min})/2$)

Q_{amp} : 荷重振幅 (= $(Q_{max} - Q_{min})/2$)

ただし、 $Q_{max} \geq Q_{min} > 0$

(6),(7)式の比較より、2つの式の差異は以下の荷重係数(C_L)の違いに帰せられる。

$$C_{L(equ)} = \exp(\alpha \cdot Q_{equ}) \quad \text{----- (9)}$$

$$C_{L(cyc)} = \exp(\alpha \cdot (Q_{ave} + Q_{amp} \cdot \sin(2\pi t/T))) \quad \text{----- (10)}$$

したがって、等価荷重(Q_{equ})は等価な荷重係数を求めることで得られる。

$C_{L(equ)}$ の値は経過時間によらず一定であるが、 $C_{L(cyc)}$ は変動荷重((8)式)と同じ周期をもつ関数となる。したがって等価な荷重係数 $C_{L(equ)}$ は、図-8に示すように、任意の繰返し回数(N)の半周期($a \leq t \leq b$, $a = N \cdot T - T/4$, $b = N \cdot T + T/4$)における $C_{L(cyc)}$ の平均値として、以下のように求められる。

$$\int_{N \cdot T - T/4}^{N \cdot T + T/4} \exp(\alpha \cdot Q_{equ}) \cdot dt = \int_{N \cdot T - T/4}^{N \cdot T + T/4} \exp(\alpha \cdot (Q_{ave} + Q_{amp} \cdot \sin(2\pi t/T))) \cdot dt \quad \text{----- (11)}$$

$$\exp(\alpha \cdot Q_{equ}) = 2/T \cdot \int_{N \cdot T - T/4}^{N \cdot T + T/4} \exp(\alpha \cdot Q_{ave} + \alpha \cdot Q_{amp} \cdot \sin(2\pi t/T)) \cdot dt \quad \text{----- (12)}$$

ここで、 $2\pi t/T = x + 2\pi N$ とおくと、 $dt = (T/2\pi) \cdot dx$ 、積分範囲(a,b)は、

$$a : N \cdot T - T/4 \rightarrow -\pi/2, \quad b : N \cdot T + T/4 \rightarrow \pi/2 \quad \text{となる。}$$

$$\therefore \exp(\alpha \cdot Q_{equ}) = 2/T \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(\alpha \cdot Q_{ave} + \alpha \cdot Q_{amp} \cdot \sin(x + 2\pi N)) \cdot (T/2\pi) \cdot dx \quad \text{----- (13)}$$

ここで、Nは正の整数(繰返し回数)であるので、 $\sin(x + 2\pi N) = \sin(x)$

$$\begin{aligned} \therefore \exp(\alpha \cdot Q_{equ}) &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(\alpha \cdot Q_{ave} + \alpha \cdot Q_{amp} \cdot \sin(x)) \cdot dx \\ &= \exp(\alpha \cdot Q_{ave}) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(\alpha \cdot Q_{amp} \cdot \sin(x)) \cdot dx \quad \text{----- (14)} \end{aligned}$$

$$\therefore Q_{e,qu} = Q_{a,ve} + \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(\alpha \cdot Q_{a,mp} \cdot \sin(x)) \cdot dx \right) \quad \text{----- (15)}$$

図-8からも明らかであるが、(15)式より等価荷重($Q_{e,qu}$)は繰返し回数(N)や周期(T)には無関係で、荷重条件(波形、 $Q_{a,ve}$ 、 $Q_{a,mp}$)と一つのクリープパラメーター(α)のみにより、一義的に決定される。

(15)式に示されたサイン波の等価荷重は、右辺第一項の一定荷重($Q_{a,ve}$)と右辺第二項の繰返し荷重振幅($Q_{a,mp}$)の効果を表わす式の、2つの荷重項から構成されている。すなわち、 $Q_{a,mp}=0(Q_{m,ax}=Q_{m,in})$ の時には、(15)式の右辺第二項が0となり、 $Q_{e,qu}=Q_{a,ve}(=Q_{m,ax}=Q_{m,in})$ となる。これは一定荷重(クリープ)载荷の場合に相当する。また、 $Q_{a,mp} \neq 0$ の場合には、(15)式の右辺第二項は非負であるので、 $Q_{e,qu} > Q_{a,ve}$ となることがわかる。表-3に上記のサイン波を含め、代表的な繰返し荷重波形における等価荷重の算出結果を示す。表-3に示された波形の等価荷重はいずれも、一定荷重($Q_{a,ve}$)項と $\alpha \cdot Q_{a,mp}$ の関数として表わされる λ を含む荷重項($1/\alpha \cdot \ln(\lambda)$)の和となっている。図-9は、この λ と $\alpha \cdot Q_{a,mp}$ の関係を示したものである。いずれも $\alpha \cdot Q_{a,mp}=0$ の場合、 $\lambda=1$ となり、したがって $Q_{e,qu}=Q_{a,ve}$ の条件が満足されている。また $\alpha \cdot Q_{a,mp}$ が大きくなるにつれ、波形の違いによる λ の値の差が大きくなっていくことがわかる。 λ の意味については、以下において考察する。

繰返し载荷による等価な塑性変位速度($dS/dt_{(e,qu)}$)は、得られた等価荷重($Q_{e,qu}$)を(6)式に代入することにより求められる。すなわち、

$$\begin{aligned} dS/dt_{(e,qu)} &= \lambda \cdot \exp(\alpha \cdot Q_{e,qu}) \cdot (t_1/t)^m \\ &= \lambda \cdot \exp(\alpha \cdot (Q_{a,ve} + 1/\alpha \cdot \ln(\lambda))) \cdot (t_1/t)^m \\ &= \lambda \cdot \exp(\alpha \cdot Q_{a,ve}) \cdot \exp(\ln(\lambda)) \cdot (t_1/t)^m \\ &= \lambda \cdot \lambda \cdot \exp(\alpha \cdot Q_{a,ve}) \cdot (t_1/t)^m \end{aligned} \quad \text{----- (16)}$$

したがって、繰返し载荷に伴う杭の塑性変位は、(16)式を積分して得られる等価荷重のクリープ変位と時間の関係として以下のように表わすことができる。

$$S_{(e,qu)} = \lambda \cdot \lambda \cdot \exp(\alpha \cdot Q_{a,ve}) \cdot t_1 \cdot \ln(t) + \text{Constant} \quad (\text{for } m=1) \quad \text{----- (17)}$$

$$S_{(e,qu)} = \lambda \cdot \lambda \cdot \exp(\alpha \cdot Q_{a,ve}) \cdot (t_1)^m \cdot (1/(1-m)) \cdot t^{1-m} + \text{Constant} \quad (\text{for } m \neq 1) \quad \text{----- (18)}$$

(2),(4),(5)式との比較により、(16),(17),(18)式は拡張されたクリープ関数¹³⁾となっていることが理解できよう。そこで、 λ は繰返し载荷に伴う塑性変位($S_{(e,qu)}$)が一定荷重(クリープ)载荷による塑性変位(S)の何倍になるかを示すもので、塑性変位の応答倍率と解釈できる。

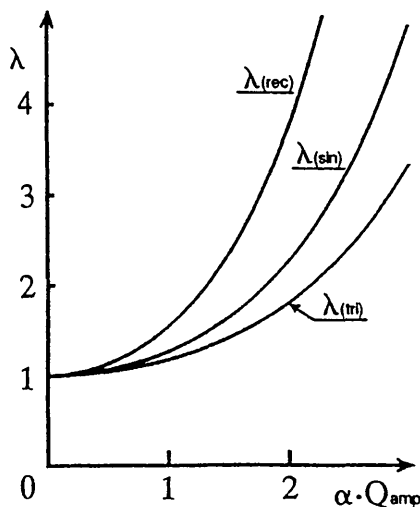


図-9 λ と $\alpha \cdot Q_{a,mp}$ の関係

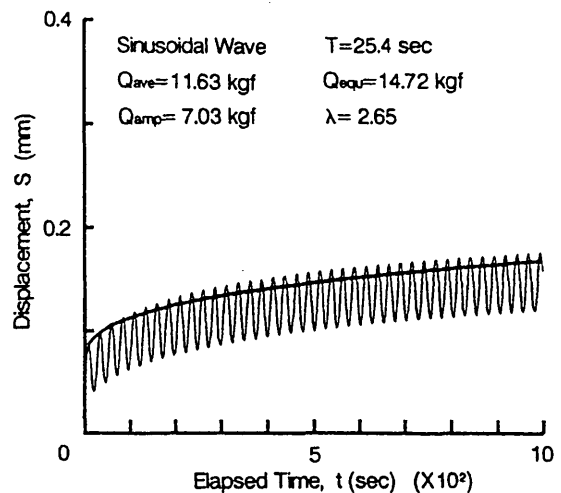


図-10 実測値と予測値の比較
(繰返し载荷試験)

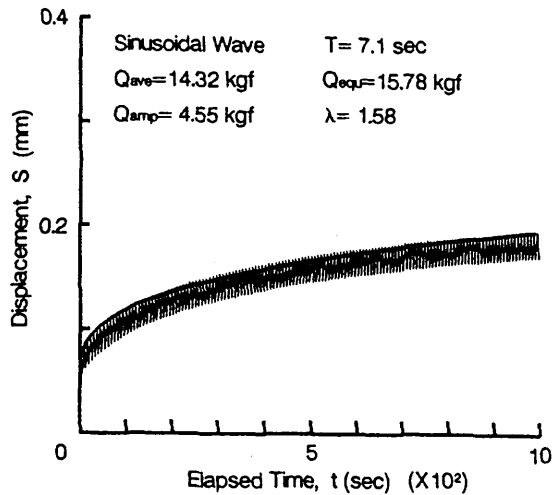


図-1 1 実測値と予測値の比較
(繰返し載荷試験)

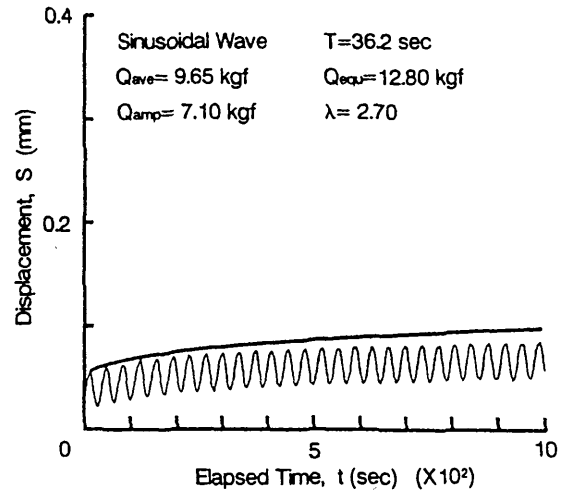


図-1 2 実測値と予測値の比較
(繰返し載荷試験)

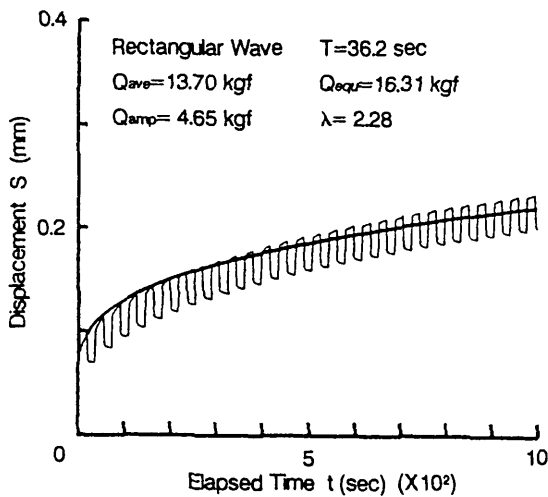


図-1 3 実測値と予測値の比較
(繰返し載荷試験)

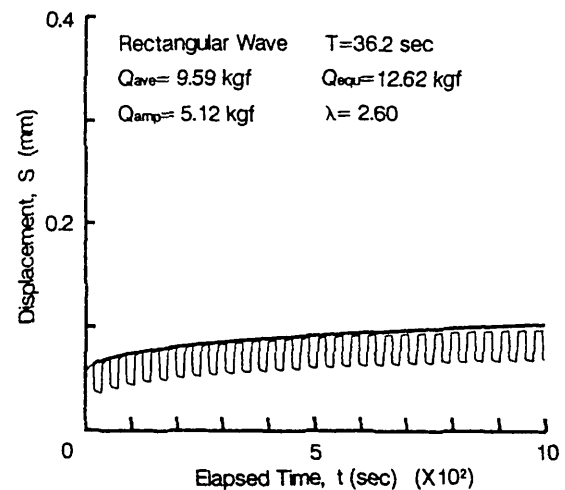


図-1 4 実測値と予測値の比較
(繰返し載荷試験)

【5】模型実験による実測値と予測値との比較

図-10~14に、繰返し載荷に伴う杭頭変位の実測値(細実線)と、塑性変位の予測値(太実線)との比較を示す。繰返し荷重条件(波形,周期, Q_{ave} , Q_{eq} , Q_{amp})および計算された等価荷重(Q_{eq})、塑性変位の応答倍率(λ)は、それぞれの図中に示してある。横軸は経過時間であり、周期(T)と繰返し回数(N)の関係は荷重時間として換算されている。図-2の結果同様、いずれの場合においても変位振幅は一定に保たれていることがわかる。この一定変位振幅は、規則的な繰返し載荷の一定荷重振幅に呼応する、杭~地盤系の弾性変形に相当するものと考えられる。

繰返し載荷に伴う杭の塑性変位の予測値は、等価荷重のクリープ変位の経時変化として与えられ、(18)式より求められる。なお、積分定数は一定荷重載荷試験の場合と同様、第一波目の最大変位と時間を与えることで求められている。図-10~14において、繰返し載荷に伴う杭の塑性変位応答の実測値は、種々の荷重条件にもかかわらず、いずれの場合にも予測値と良い一致を示している。このことは、一方向の繰返し軸荷重を受ける粘土中の摩擦杭の塑性変位の累積は、それを支える粘土のクリープ変形に起因するものであることを示している。

【6】まとめ

粘土中の摩擦杭に一方方向の規則的な繰返し軸荷重が作用すると、変位振幅は一定に保たれたまま、塑性変位が累積する。本研究ではこの塑性変位に着目し、杭に作用する規則的な繰返し軸荷重を、一連のクリープ荷重の集合と仮定することにより、静的な等価荷重に置き換えることができることを示した。したがって、繰返し载荷に伴う杭の塑性変位はこの静的な等価荷重のクリープ変位の経時変化として与えられる。

この等価荷重によれば、繰返し载荷に伴う杭の塑性変位応答に影響を及ぼす一定荷重($Q_{v,c}$)、荷重振幅($\pm Q_{a,c}$)、荷重波形、および杭を支える地盤の力学的特性等の諸要因の定量的評価が可能となる。なお、周期(T)と繰返し回数(N)の関係は载荷時間として表現される。

これらの関係は、模型実験による実測値と比較され、満足できる結果を示した。

<参考文献>

- 1) Jaime et al.(1990) : "Behavior of friction piles in Mexico City Clay," Journal of Geotechnical Engineering, Vol.116, No.6, pp.915-931
- 2) Turner & Kulhawy(1990) : "Drained uplift capacity of drilled shafts under repeated axial loading," Journal of Geotechnical Engineering, Vol.116, No.3, pp.470-491
- 3) McAnoy et al.(1982) : "Cyclic tensile testing of a pile in glacial till," 2nd Numerical Method in Offshore Piling, pp.257-292
- 4) Puech(1982) : "Basic data for the design of tension piles in silty soils," 3rd Behaviour of Offshore Structures, BOSS'82, Vol.1, pp.141-157
- 5) Karlsrud et al.(1986) : "Piles in clay under cyclic axial loading (Field tests and computational modelling)," 3rd Numerical Method in Offshore Piling, pp.165-190
- 6) 稲 他(1989) : "繰返し軸方向荷重を受ける粘土地盤中の摩擦杭の限界荷重", 第24回土質工学研究発表会, pp.1313-1316
- 7) Vaid & Campanella(1977) : "Time-dependent behavior of undisturbed clay," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, No.GT7, pp.693-709
- 8) Housel(1959) : "Dynamic and static resistance of cohesive soil," Papers on soils - 1959 meetings, ASTM STP NO.254, pp.4-35
- 9) 村山・柴田(1958) : "粘土中の摩擦グイの支持力とその新測定法", 土木学会論文集, 第59号, pp.49-56
- 10) Hansbo(1984) : "Foundations on friction creep piles in soft clays," Proc., International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Vol.2, pp.913-922
- 11) Hyde & Brown(1976) : "The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading," Geotech., Vol.26, No.1, pp.173-184
- 12) Hyde & Ward(1985) : "A pore pressure and stability model for a silty clay under repeated loading," Geotech., Vol.35, No.2, pp.113-125
- 13) Singh & Mitchell(1968) : "General stress-strain-time function for soils," J.,SMF, Vol.94, No.SM1, pp.21-46
- 14) 松井 他(1977) : "飽和粘土の力学的特性に及ぼす動的応力履歴の影響", 土木学会論文報告集, 第257号, pp.41-51
- 15) 稲・岸田(1988) : "粘性土地盤の摩擦杭の挙動と間隙水圧変化", 第23回土質工学研究発表会, pp.1413-1416
- 16) Mitchell et al.(1968) : "Soil creep as a rate process," J.,SMF, Vol.94, No.SM1, pp.231-253
- 17) Chan(1981) : "An electropneumatic cyclic loading system," Geotech.Test.J., Vol.4, No.4, pp.183-187
- 18) 栗原(1972) : "粘土のクリープ破壊に関する実験的研究", 土木学会論文報告集, 第202号, pp.59-71

定 価 3,000 円 (本体2,913円)

繰返し応力を受ける地盤の変形に関する

シンポジウム発表論文集

平成2年11月20日発行

編 集 社団法人 土 質 工 学 会

土の繰返し圧密研究委員会

発 行 者 社団法人 土 質 工 学 会

印 刷 所 丸 栄 株 式 会 社

発 行 所 社団法人 土 質 工 学 会

〒101 東京都千代田区神田淡路町2丁目23番地(菅山ビル)

電 話 東京 03 (251) 7661 (代)

振替口座 東京 4-40786

© 1990 社団法人 土質工学会

2. 11. 500 - 2,300