

(株)武智工務所 ○ 稲 国芳
 東京工業大学 岸田 英明

〔1〕はじめに

粘土中の摩擦杭に規則的な一方向繰返し軸方向荷重が作用すると、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、変位振幅はほぼ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。このような杭の変形挙動は、現場実験 (McAnoy et al.:1962, Puech:1982, Karlsrud et al.:1986) や模型実験 (稲 他:1989) において観察されており、繰返し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。一方、繰返し載荷に伴う杭の塑性変位応答は、荷重振幅 ($\pm Q_{cyc}$)、平均荷重 (Q_{ave})、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で特徴づけられる。変形に関する特性はすなわち、粘土のクリープである。Hyde & Brown (1976) は、非排水条件下における粘性土のクリープ特性と一方向繰返しせん断特性の類似性に着目し、繰返し載荷による三軸供試体の塑性ひずみ速度の予測に、Singh & Mitchell (1968) のクリープ関数を応用できることを見出している。

本研究は、上述のHyde & Brown (1976) の手法を応用することにより、一方向の規則的な繰返し軸方向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クリープ（一定荷重）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、近似することにより、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、本報告におけるクリープ試験および一方向繰返し試験は、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 ($W_L=64.9\%$, $W_p=26.9\%$) である。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に、空気が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、剛な加压板で7日間予備圧密 (圧密圧力 0.23 kgf/cm^2) を行なった。その後、圧密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 0.70 kgf/cm^2) を行なった。所定の圧密終了後、閉ざされていた上下の杭の貫入孔の栓を取外し、 30 mm/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-1) は内径 240 mm 、有効深さは 374 mm 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。模型杭 ($\phi 19 \text{ mm}$) 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を受ける (Mitchell et al.:1968) 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 $25^\circ\text{C} \pm 0.5$ に保った。

杭の載荷は空圧式繰返し載荷方式 (Chan:1981) で行なった。クリープ試験および一方向繰返し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、それぞれ一定荷重を保持、もしくは繰返し荷重を加えた。

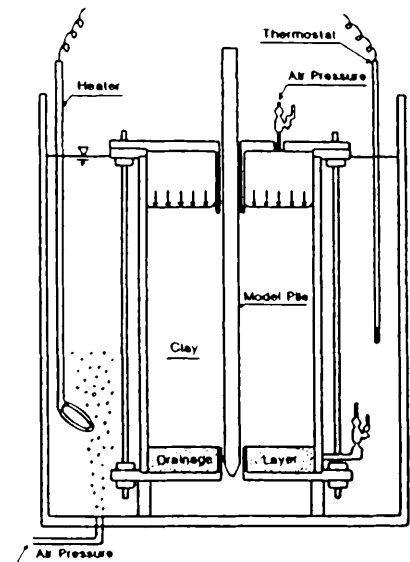


図-1 実験土槽

表-1 クリープパラメーター

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

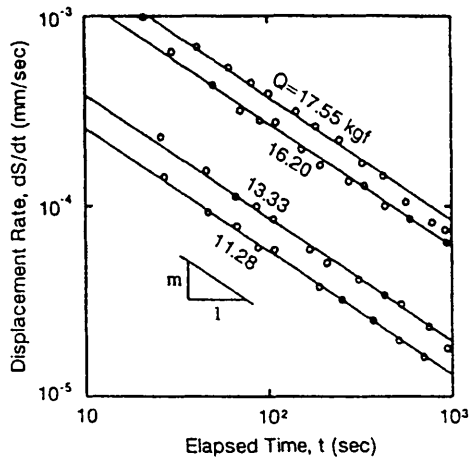


図-2 杭頭変位速度と経過時間の関係

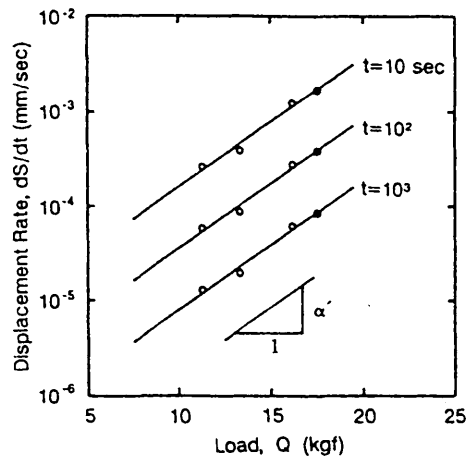


図-3 杭頭変位速度と荷重の関係

【3】実験結果

(1) クリープ（一定荷重）載荷試験

図-2は一定荷重載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-3は杭頭変位速度 (dS/dt) の対数を縦軸に、載荷荷重 (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 & Mitchell (1968) は三軸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 & Mitchell (1968) 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。なお、(1) 式の理論的背景をなしているのは、土の変形機構に対してレート・プロセス理論の適用を図った Mitchell et al. (1968) の研究である。

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-2) 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-3) 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。本実験で得られた杭~地盤系のクリープパラメーターを表-1に示す。

(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。すなわち、

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

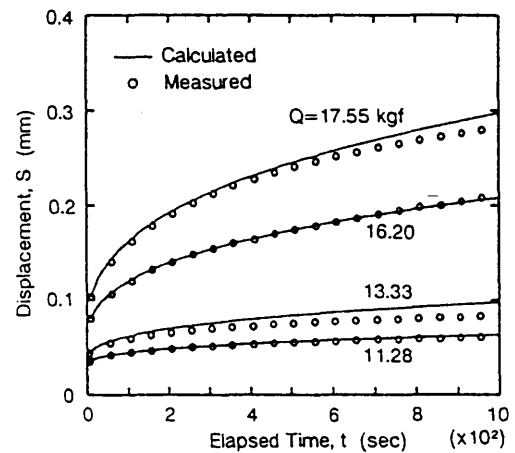


図-4 実測値と計算値の比較 (クリープ試験)

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

m=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(1958)モデルが表現されている。一方、(5)式は変位が時間とともに指数的に変化する場合で、指数クリープとよばれる。

得られた3つのパラメーター(表-1)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-4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-4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クリープ変位の経時変化を近似的に求めることができる。

(2) 一方向繰返し载荷試験

Hyde & Brown(1976)は、一方向の繰返し非排水せん断試験における変動応力を、図-5に示すような一連のクリープ応力の集合と仮定し、近似することにより、繰返し载荷による塑性ひずみ速度をクリープ試験結果から予測することに成功している。図-5は10等分の時間刻みで近似された正弦波の一部を表しており、同図の右側の数値は各々の近似区間で発揮されるクリープ応力としての割合である。

杭に作用する繰返し荷重(正弦波, $Q_{max}=15.0\text{kgf}$, $Q_{min}=5.0\text{kgf}$)に同様の手法を用いた近似計算例を表-2に示す。表-2の左側の欄は、図-5に示された割合に応じて10段階のクリープ荷重に代表された繰返し荷重を表している。これらのクリープ荷重を(2)式に代入することにより、異なった経過時間(ここでは $t=500\text{sec}$ と 1000sec)における変位速度の計算結果が右側の2つの欄に示されている。正弦波による繰返し荷重時の塑性変位速度は、それぞれの経過時間における10個のクリープ変位速度を平均することにより求められる(Hyde & Brown:1976)。

一方、表-2の下段には、これらの平均変位速度を再度(2)式に代入することにより、逆算された荷重(等価荷重)が示されている。表-2からわかるように、平均変位速度の値は経過時間により変化するものの、等価荷重は経過時間にかかわらず一定の値を示している。このことはすなわち、作用している繰返し荷重と等しい変位速度効果をもつ静的な荷重が求められたことを意味する。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として表現できよう。

図-6~9に、繰返し载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)の比較を示す。繰返し荷重条件および計算された等価荷重(Q_{eq})は、それぞれの図中に示してある。正弦波における等価荷重の計算は表-2の例に比べ、より細かい刻みで行ない、その近似度を高めてある。一方、矩形波における等価荷重は、任意の経過時間における Q_{max} と Q_{min} の変位速度の平均値から求めている。これらの算出に

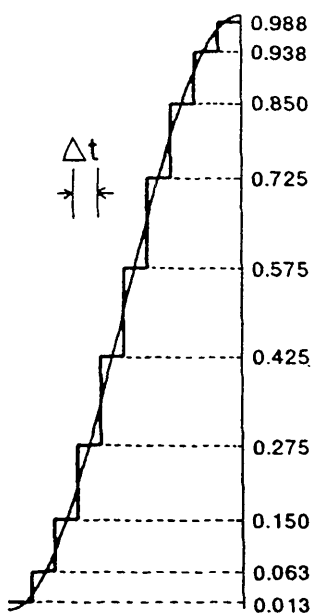


図-5 繰返しせん断応力波の近似方法 (After Hyde & Brown:1976)

表-2 繰返し荷重(正弦波, $Q_{max}=15.0\text{kgf}$, $Q_{min}=5.0\text{kgf}$)の近似計算例

Cyclic Load		Disp. Rate* from Equ. (2) for $t=500\text{sec}$	Disp. Rate* from Equ. (2) for $t=1000\text{sec}$
Proportion	Load (kgf)		
0.988	14.88	5.78×10^{-5}	3.68×10^{-5}
0.938	14.38	4.94×10^{-5}	3.15×10^{-5}
0.850	13.50	3.75×10^{-5}	2.39×10^{-5}
0.725	12.25	2.53×10^{-5}	1.61×10^{-5}
0.575	10.75	1.58×10^{-5}	1.00×10^{-5}
0.425	9.25	9.83×10^{-6}	6.26×10^{-6}
0.275	7.75	6.13×10^{-6}	3.91×10^{-6}
0.150	6.50	4.13×10^{-6}	2.63×10^{-6}
0.063	5.63	3.14×10^{-6}	2.00×10^{-6}
0.013	5.13	2.68×10^{-6}	1.71×10^{-6}
Mean Disp. Rate*		2.12×10^{-5}	1.35×10^{-5}
Equivalent Load (kgf) from Equ. (2)		11.69	11.69

* Displacement Rate, Unit : mm/sec

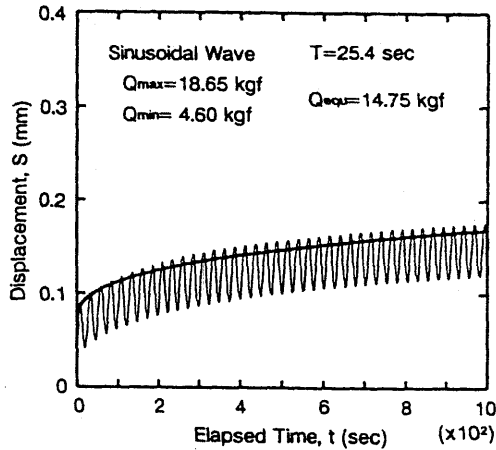


図-6 実測値と予測値の比較（繰返し試験）

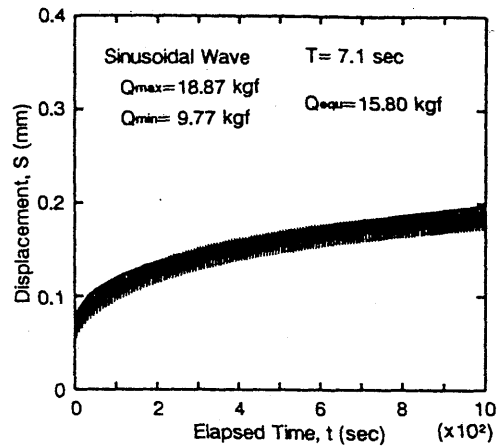


図-7 実測値と予測値の比較（繰返し試験）

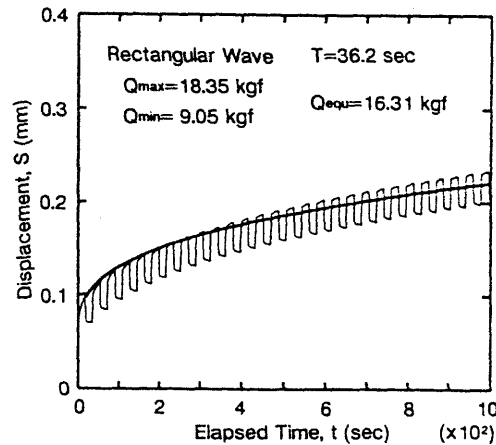


図-8 実測値と予測値の比較（繰返し試験）

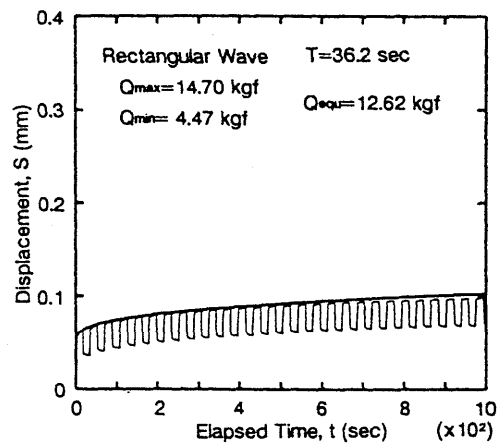


図-9 実測値と予測値の比較（繰返し試験）

においては、Matsui et al. (1980)、平尾 他 (1988) の研究をもとに、塑性変位の累積過程に与える周期と繰返し回数の関係は載荷時間に換算できるものと仮定している。したがって、塑性変位の予測値は、算出された等価荷重を(5)式に代入することにより求められる、クリープ変位の経時変化として与えられている。なお、積分定数はクリープ試験の場合と同様、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-6~9において、繰返し載荷に伴う杭の塑性変位応答は、種々の荷重条件にもかかわらず、予測値と良好一致を示している。このことは、一方向の繰返し軸方向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。

【4】まとめ

粘土中の模型摩擦単杭に作用する規則的な一方向繰返し軸方向荷重を、一連のクリープ荷重の集合と仮定し、近似することにより、繰返しに伴う杭の塑性変位を、クリープ現象の解析方法で予測できることを示した。

<参考文献> 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 平尾 他(1988), "塑性の高い飽和粘土の非排水繰返し三軸試験", 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム, (社)土質工学会, pp.113-118 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 Chan(1981), "An electropneumatic cyclic loading system," Geotech. Test. J., Vol. 4, No. 4, pp.183-187 Hyde & Brown(1976), "The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading," Geotech., Vol. 26, No. 1, pp.173-184 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 Matsui et al. (1980), "Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay," J., GED, Vol. 106, No. GT10, pp.1101-1120 McAnoy et al. (1982), "Cyclic tensile testing of a pile in glacial till," 2nd Numerical Method in Offshore Piling, pp.257-292 Mitchell et al. (1968), "Soil creep as a rate process," J., SMP, Vol. 94, No. SM1, pp.231-253 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 Singh & Mitchell(1968), "General stress-strain-time function for soils," J., SMP, Vol. 94, No. SM1, pp.21-46