

# 粘性土中の杭の繰返し引抜き挙動

## CYCLIC PULL-OUT BEHAVIOR OF PILES IN COHESIVE SOIL

稲 国芳\*, 岸田英明\*\*  
Kuniyoshi INA and Hideaki KISHIDA

Three types of pull-out field tests were carried out to examine the performance of a closed-form solution in estimating the displacements of piles in cohesive soil subjected to regular cyclic axial loading. The test program included static loading, creep loading and cyclic loading. Discussion was focused on the interpretation of the static loading test results. The procedures are proposed to estimate the pile displacement under cyclic loading from the static loading test results. The results indicate that the calculated displacements of piles subjected to cyclic pull-out loading are in good agreement with the measurements.

**Keywords :** pile, cyclic load, displacement, cohesive soil, pull-out test

杭, 繰返し荷重, 変位, 粘性土, 引抜き試験

### 1. はじめに

筆者らは前報<sup>1)</sup>で、一方向の規則的な繰返し軸荷重を受ける粘土中の杭の変位応答の解析解を提案し、その妥当性を模型実験で検証した。この解は、一定軸荷重を受ける粘土中の杭の即時変位応答式およびクリープ変位応答式を拡張することによって得られたもので、閉解として与えられている。したがって、この解によれば、杭の変位応答に影響を及ぼす繰返し荷重の平均値、振幅、波形、周期、載荷時間および杭を支える地盤(粘土)の力学的特性等の諸要因の定量的評価が簡単に行える。しかしながら、前報<sup>1)</sup>では以下の2点が未解決のままで残されていた。

- ① 小型模型による実験結果との比較・検討だけでは、解の妥当性が真に検証されたとは言い難い。
- ② 解に含まれるパラメーターの実用的な求め方が確立されていない。

そこで、上記の問題を解決することを目的として、粘性土地盤に打ち込まれた8本の鋼管杭に各種の引抜き試験を実施した。試験内容は、静的載荷、クリープ載荷および繰返し載荷である。本論は、これらの実験結果と種々の解析結果について述べたものである。なお、ここでいう静的載荷とは、杭に荷重を段階的に作用させ、その荷重増分および荷重保持時間をすべて一定とする試験のことである。クリープ載荷とは、杭に速やかに荷重を作用させ、その荷重を一定に保持する試験のことである。繰返し載荷とは、規則的で準静的な繰返し荷重を杭に作用

させる試験のことである。

以下では、第2章と第3章で実験の概要と結果を示す。次に、第4章で杭の変位応答の解析解について簡単に述べ、第5章ではその解に含まれるパラメーターを求めるための実用的な方法を提案する。さらに、第6章では、パラメーターを決定する具体的な手順について説明し、計算結果と実験結果の比較を示す。

### 2. 実験概要

実験は埼玉県八潮市で行った。敷地は「中川低地」と呼ばれる沖積低地上に位置する。試験地点の地盤概要を図-1に示す。試験杭は、杭径190.7mm、杭長12m(地中部11.3m)、肉厚5.3mmの先端閉塞鋼管杭であり、ドロップハンマーにより8本打設した。試験杭の配置を図-2に示す。杭をNo.1~No.8とし、以後、試験杭は

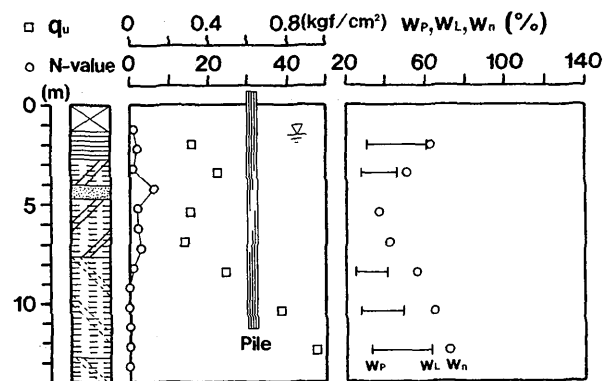


図-1 地盤概要

\* ジオトップ

\*\* 東京工業大学 教授・工博

Geotop Corporation  
Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

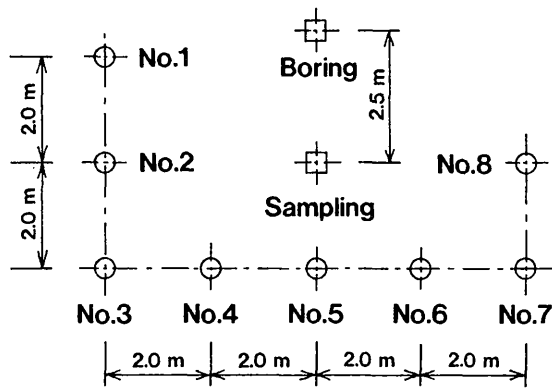


図-2 試験杭の配置

表-1 引抜き荷重試験条件

Pile No.	Test No.	Loading Test	$Q_{ave}$ (tf)	$Q_{amp}$ (tf)	$Q_{max}$ (tf)	$Q_{min}$ (tf)	Loading Time*(sec)
1	1-1	Creep	12.5	0	12.5	12.5	7200
	1-2	Creep	16.0	0	16.0	16.0	1800
	1-3	Creep	16.5	0	16.5	16.5	480
2	2	Static	-	-	-	-	-
3	3-1	Cyclic	10.0	3.0	13.0	7.0	6240
	3-2	Cyclic	13.5	3.0	16.5	10.5	5040
4	4-1	Cyclic	9.5	4.5	14.0	5.0	6120
	4-2	Cyclic	11.0	6.0	17.0	5.0	5280
5	5-1	Cyclic	12.5	1.5	14.0	11.0	6120
	5-2	Cyclic	12.5	4.5	17.0	8.0	2520
	5-3	Cyclic	12.5	5.5	18.0	7.0	1680
6	6	Static	-	-	-	-	-
7	7-1	Creep	12.5	0	12.5	12.5	7200
	7-2	Creep	17.0	0	17.0	17.0	1860
8	8-1	Cyclic	10.5	4.5	15.0	6.0	6120
	8-2	Cyclic	14.5	4.5	19.0	10.0	3600

\*In Case of Cyclic Loading Tests,  $t = N \cdot T$   
( $t$ : Loading Time,  $N$ : Number of Cycles,  $T$ : Period)

番号で区別する。杭打設終了から22日経過後に実験を開始した。

試験は引抜き荷重である。試験内容(表-1)は、静的荷重、クリープ荷重および繰返し荷重である。静的荷重試験杭を除き、同一の杭に連続して複数回荷重した。これらの荷重方法については、後述の実験結果と合わせて説明する。繰返し荷重試験における荷重( $Q_{cyc}$ )は、波形を正弦波と仮定すると時間( $t$ )の関数として、以下のよう表せる。

$$Q_{cyc} = Q_{ave} + Q_{amp} \cdot \sin(2\pi t/T) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $Q_{ave}$ は平均荷重、 $Q_{amp}$ は荷重振幅、 $T$ は周期である。したがって、表-1の荷重条件は式(1)に従って表してある。すなわち、繰返し荷重の最大値( $Q_{max}$ )と最小値( $Q_{min}$ )はそれぞれ、以下のようになる。

$$Q_{max} = Q_{ave} + Q_{amp} \dots \dots \dots (2)$$

$$Q_{min} = Q_{ave} - Q_{amp} \dots \dots \dots (3)$$

また、繰返し荷重試験における荷重時間とは、繰返し荷

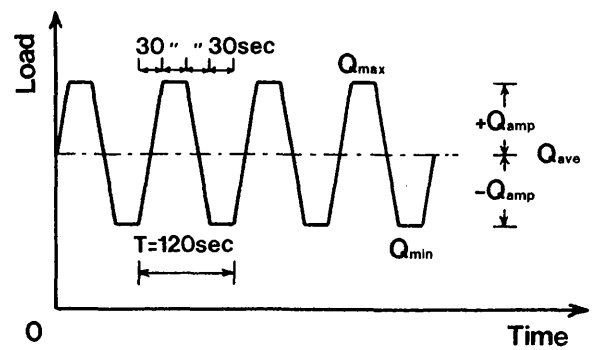


図-3 試験に用いた規則的な繰返し荷重

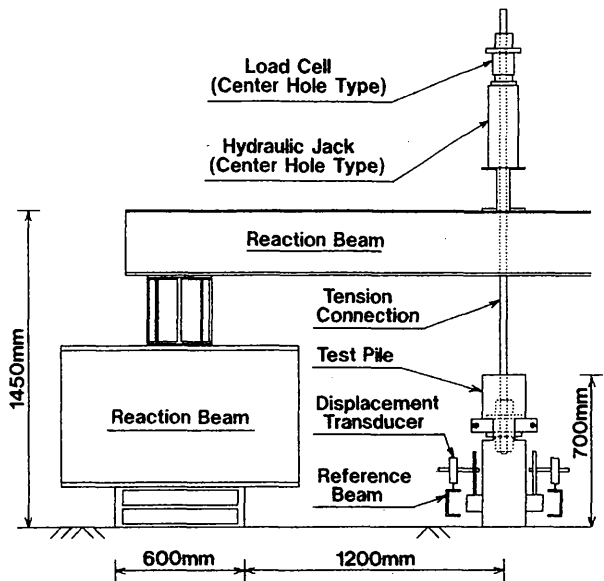


図-4 荷重試験装置

重の周期(図-3、 $T=120$ 秒)と繰返し回数との積のことである。なお、クリープ荷重は、式(1)において $Q_{amp}=0$ の場合に相当するので、 $Q_{ave}=Q_{max}=Q_{min}$ となる。

静的荷重試験は、荷重増分を1.50tf、荷重保持時間を15分として1サイクルで行った。クリープ荷重試験では、所定の荷重レベルまで速やかに荷重した後、荷重を一定に保持した。繰返し荷重試験では、クリープ荷重試験と同様、所定の荷重レベル( $Q_{ave}$ )まで速やかに荷重した後、台形波による規則的な繰返し荷重(図-3)をすぐに杭に作用させた。したがって、所定の荷重( $Q_{ave}$ )を杭に作用させ終えた時点が繰返し荷重開始( $t=0$ )となる。

荷重試験装置を図-4に示す。荷重にはセンターホール型の油圧ジャッキを使用し、荷重反力は反力盤により地耐力負担とした。測定項目は荷重、杭頭部4カ所の変位および時間であり、10秒間隔で計測した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 静的荷重試験

図-5に杭No.2と杭No.6の静的荷重試験結果を示

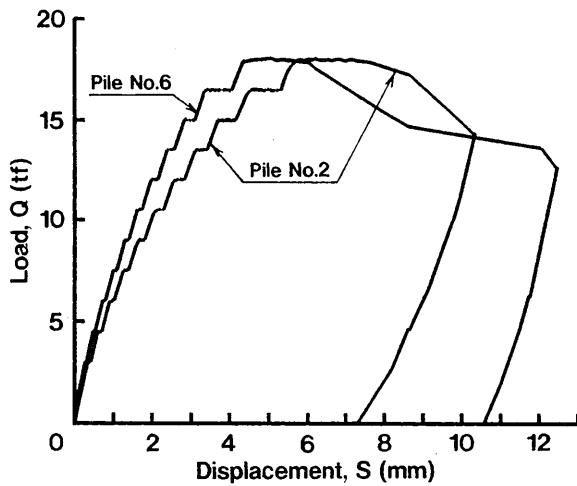


図-5 静的載荷試験 (杭 No.2, 杭 No.6) の荷重～変位曲線

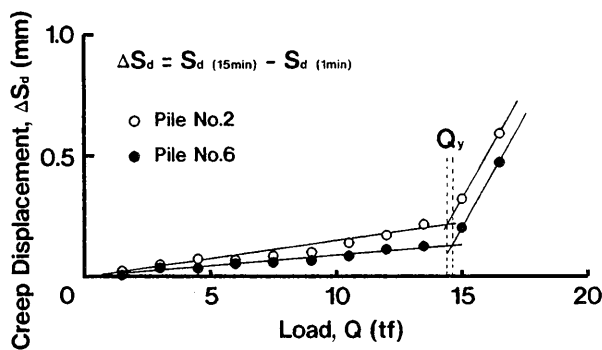


図-6 静的載荷試験 (杭 No.2, 杭 No.6) のクリープ変位と荷重の関係

す。荷重～変位曲線はいくぶん異なっているにもかかわらず、両試験から得られた極限荷重 ( $Q_u$ ) の値 (=18.0 tf) は同じであった。

図-6 は、図-5 の結果をもとに、荷重保持時間中 (ただし、載荷してから1分～15分の間) に発生したクリープ変位 ( $\Delta S_d$ ) とその時の荷重の関係を示したものである。図-6 に示す方法は慣用の降伏荷重判定法<sup>2)</sup>のひとつ (いわゆる  $\Delta S/\Delta \log t-Q$  法) と本質的に同じであるので、2本の直線の交点に対応する荷重値は杭の降伏荷重 ( $Q_y$ ) に相当する。両試験で得られた降伏荷重の大きさ (杭 No.2 は 14.4 tf, 杭 No.6 は 14.6 tf) は、極限荷重の場合と同様、ほぼ同じであった。したがって、本実験における杭の降伏荷重は、両者の平均値 (=14.5 tf) で代表する。

### 3.2 クリープ載荷試験

図-7(a) (b) は、変位と経過時間の関係として表した、杭 No.1 と杭 No.7 のクリープ載荷試験結果である。クリープ載荷は同一の杭に複数回実施しており、いずれも荷重を一旦完全に除荷した後、次の載荷を行った。同図に示した OLR (Over-Load Ratio)<sup>3)</sup> とは、杭に作用する一定荷重を上述の降伏荷重で除した値のことである。すなわち、

$$OLR_{(creep)} = Q_{ave}/Q_y (= Q_{max}/Q_y) \dots \dots \dots (4)$$

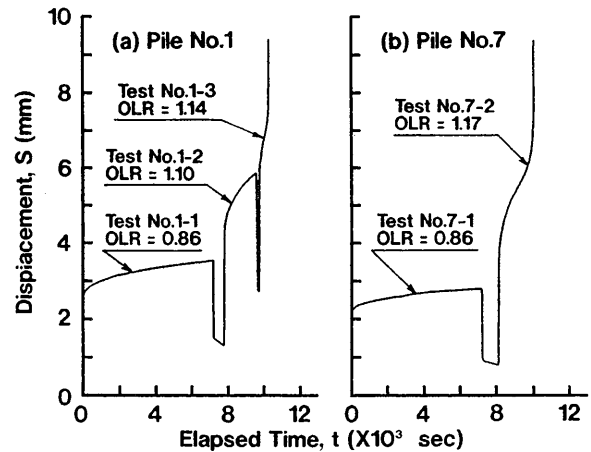


図-7 クリープ載荷試験 ((a) 杭 No.1, (b) 杭 No.7) の変位～時間曲線

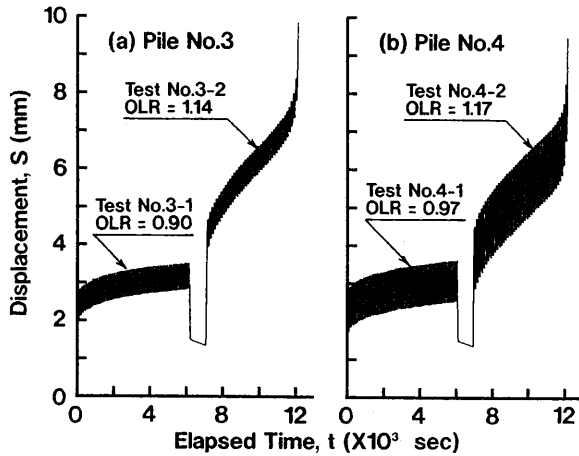
図-7(a) (杭 No.1) は、1回目の荷重を7200秒間載荷した後、完全に除荷したうえで約9分間放置し、2回目の荷重を1800秒間載荷して再度除荷し、すぐに3回目の荷重を載荷したところ、480秒後に杭は破壊に至ったことを表している。図-7(b) (杭 No.7) は、1回目の荷重を7200秒間載荷した後、完全に除荷したうえで約14分間放置し、2回目の荷重を載荷したところ、1860秒後に杭は破壊に至ったことを示している (表-1 参照)。

杭 No.1 と杭 No.7 の1回目の載荷重の大きさ (=12.5 tf) は同じであるにもかかわらず、得られた変位応答 (即時変位の大きさ、クリープ変位の経時変化) には、やや差が生じている。これは、静的載荷における2本の杭の荷重～変位曲線 (図-5) の差異と同様、実験敷地内の地盤性状の変化によるものと考えられる。いずれにしろ、静的載荷におけるクリープ変位と荷重の関係 (図-6) が暗示しているように、 $OLR > 1$  の条件下では杭は著しいクリープ変位を生じ、甚だしい場合には破壊に至ることがわかる。

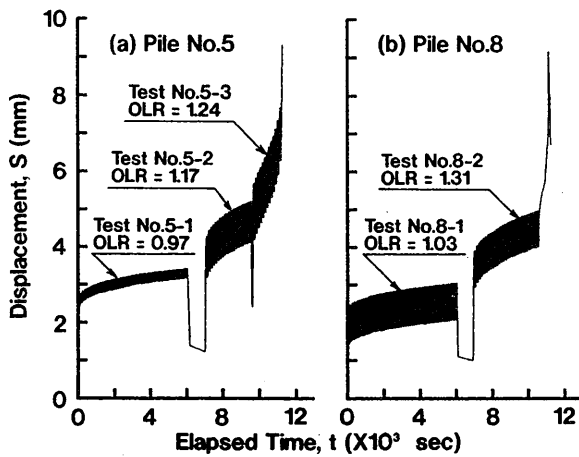
### 3.3 繰返し載荷試験

繰返し載荷試験は、残りの4本の杭に対して行った。上述のクリープ載荷同様、繰返し載荷は同一の杭に複数回実施しており、いずれも荷重を一旦完全に除荷し、次の載荷に備えた。表-1 に示したように、杭 No.3 の2つの試験は、 $Q_{amp}$  の値は同じであるが  $Q_{ave}$  の値を違えた荷重条件であり、杭 No.8 の2つの試験も同様の条件で行ったものである。一方、杭 No.4 の2つの試験は、 $Q_{min}$  の値は同じであるものの  $Q_{max}$  の値を変えており、杭 No.5 の3回の繰返し載荷は、 $Q_{ave}$  の値を一定として  $Q_{amp}$  の値をそれぞれ変化させた試験である。

図-8(a) (b)～9(a) (b) に繰返し載荷試験結果を示す。これらの結果は、クリープ載荷の場合と同様、変位と経過時間の関係で表してある。繰返し載荷における OLR とは、杭に作用させた繰返し荷重の最大値を降伏



図—8 繰返し載荷試験 ((a) 杭 No. 3, (b) 杭 No. 4) の変位～時間応答曲線



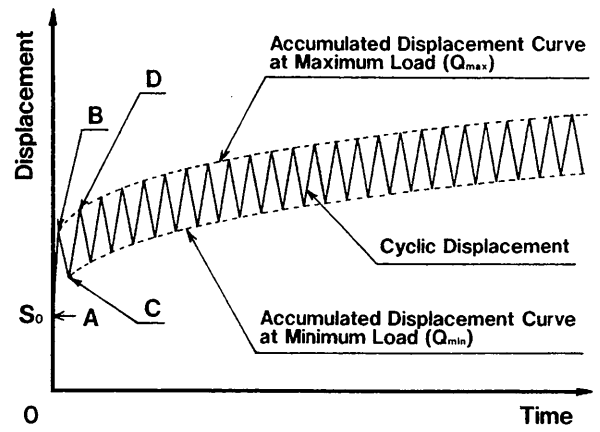
図—9 繰返し載荷試験 ((a) 杭 No. 5, (b) 杭 No. 8) の変位～時間応答曲線

荷重で除した値のことである。すなわち、

$$OLR_{(cyclic)} = Q_{max} / Q_y \dots\dots\dots (5)$$

繰返し載荷に伴う杭の変位は、後述の図—10 に示すように、繰返し変位と累積変位に分けて考えることができる。繰返し変位とは繰返し荷重（荷重振幅）の変化に対応して発生する変位のことであり、その大きさは変位振幅として表される。荷重振幅の大きさがゼロであるクリープ載荷では、繰返し変位（変位振幅）の大きさはゼロである。図—8～9 より、変位振幅の大きさは、破壊間際の不安定な部分を除き、いずれの試験においても繰返し載荷中常に一定であることがわかる。また、平均荷重値は異なっても、荷重振幅の大きさが同じであれば変位振幅の大きさは等しいことがわかる（杭 No. 3 における試験 No. 3-1 と 3-2, 杭 No. 8 における試験 No. 8-1 と 8-2）。このことはすなわち、変位振幅の大きさは、平均荷重値には無関係で、荷重振幅の大きさにのみ依存することを意味している。

図—8～9 に示した繰返し載荷における杭の累積変位曲線（図—10 参照）は、図—7 に示したクリープ載荷の変位～時間曲線（クリープ曲線）と酷似している。



図—10 一方向の規則的な繰返し軸荷重を受ける杭の変位～時間応答曲線

OLR < 1 の繰返し荷重下の杭では、OLR < 1 のクリープ載荷の場合と同様、今回の載荷時間の範囲内では破壊の兆候はまったく見られない（試験 No. 3-1, 4-1, 5-1）。上述のように変位振幅の大きさは繰返し載荷中常に一定なので、規則的な繰返し引抜き荷重を受ける粘性土中の杭が破壊に至る場合には、この累積変位の増大による破壊モードとなる。OLR > 1 の繰返し荷重下の杭は、OLR > 1 のクリープ載荷の場合と同様、著しい累積変位を生じ、甚だしい場合には破壊に至っている（試験 No. 3-2, 4-2, 5-3）。しかしながら、杭 No. 8 では、2 回目の試験（試験 No. 8-2）の  $Q_{max}$  値が極限荷重を超える繰返し載荷を 3 600 秒間継続したものの、破壊を示す明確な兆候が得られなかったため、途中で載荷を中止した。これは、同一敷地内とはいえ杭打設地点（図—2）の左側と右側では地盤性状がやや異なり、杭 No. 8 の打設地点はこの差異が特に顕著であったものと考えられる。杭打設地点（図—2）の左側と右側の地盤性状の差異は、杭 No. 2 に比べて杭 No. 6 の荷重～変位剛性（図—5）が大きいこと、および杭 No. 1 と杭 No. 7 の 1 回目の同じ大きさの荷重によるクリープ載荷の変位応答（図—7）に違いが見られることから推察される。

以上の実験結果は、安定の確保はもちろんのこと過度の変形を防止するためにも、粘性土中の杭に許容する繰返し引抜き荷重（すなわち、一方向の繰返し軸荷重）の最大値を降伏荷重以下に設定することが必要であることを示している。

#### 4. 解析解

ここでは、一方向の規則的な繰返し軸荷重を受ける粘土中の杭の変位応答の解析解（閉解）について簡単に述べる。詳細については、前報<sup>1)</sup>を参照されたい。なお、杭に作用する規則的な繰返し軸荷重は当初、起点である平均値 ( $Q_{ave}$ ) から増加し始める場合と減少し始める場合があるが、本解析解は、図—3 に示すように、増加し始める場合のものである。

図一10 は一方向の規則的な繰返し軸荷重を受ける杭の変位～時間応答曲線を表した模式図である。A 点は繰返し載荷開始直前における杭の変位を表す。繰返し荷重に対応して杭の変位は B-C-D 点…へと変化する。上下の点線は、繰返し変位～時間応答曲線の包絡線であり、ここではそれぞれ繰返し荷重の最大値 ( $Q_{max}$ ) における累積変位曲線、繰返し荷重の最小値 ( $Q_{min}$ ) における累積変位曲線と呼ぶ。以下に示す  $S_{upper}$  と  $S_{lower}$  は、これら 2 つの累積変位曲線を表す解析解である。

$$S_{upper} = \frac{\lambda \cdot B_1 \cdot t_1 \cdot \exp(\beta \cdot Q_{ave})}{1-n} \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^{1-n} + C_{upper}$$

$$C_{upper} = S_0 + \frac{a \cdot Q_{max}}{1-b \cdot Q_{max}} - \frac{a \cdot Q_{ave}}{1-b \cdot Q_{ave}} + (\mu - \lambda) \cdot \frac{B_1 \cdot t_1 \cdot \exp(\beta \cdot Q_{ave})}{1-n} \cdot \left(\frac{T/4}{t_1}\right)^{1-n}$$

ただし、 $t \geq T/4$ ……………(6)

$$S_{lower} = \frac{\lambda \cdot B_1 \cdot t_1 \cdot \exp(\beta \cdot Q_{ave})}{1-n} \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^{1-n} + C_{lower}$$

$$C_{lower} = C_{upper} - \frac{2 \cdot a \cdot Q_{amp}}{1-b \cdot Q_{amp}}$$

ただし、 $t \geq 3T/4$ ……………(7)

- ここに、 $Q_{ave}$ ：繰返し荷重の平均値（平均荷重）  
 $Q_{amp}$ ：繰返し荷重の振幅（荷重振幅）  
 $Q_{max}$ ：繰返し荷重の最大値（最大荷重）（ $= Q_{ave} + Q_{amp}$ ）  
 $T$ ：繰返し荷重の周期  
 $t$ ：載荷時間  
 $S_0$ ：繰返し載荷開始直前（図一10の A 点、 $t=0$ ）における杭の変位  
 $a, b$ ：即時変位パラメーター  
 $B_1, \beta, n$ ：クリープ変位パラメーター  
 $t_1$ ： $B_1$  を定義する際の基準時間  
 $\mu, \lambda$ ：クリープ変位の応答倍率

なお、 $\mu$  と  $\lambda$  は繰返し荷重波形によって決定される値であり、本実験で用いた台形波の場合、以下の式で表される。

$$\mu = (1-e) \cdot \exp(\beta \cdot Q_{amp}) + e \cdot \frac{\exp(\beta \cdot Q_{amp}) - 1}{\beta \cdot Q_{amp}}$$

……………(8)

$$\lambda = (1-e) \cdot \cosh(\beta \cdot Q_{amp}) + e \cdot \frac{\sinh(\beta \cdot Q_{amp})}{\beta \cdot Q_{amp}}$$

……………(9)

ここに、 $e$  は荷重波形係数であり、 $e=0$  の場合には矩形波に、 $e=1$  の場合には三角波に対応する。今回用いた形状の台形波（図一3）では、 $e=0.5$  である。

図一10の上下の点線の差、すなわち、 $S_{upper}$  と  $S_{lower}$  の差は繰返し変位の両振幅 ( $S_{DA}$ ) に対応するので、式 (6) (7) より、

$$S_{DA} = \frac{2 \cdot a \cdot Q_{amp}}{1 - b \cdot Q_{amp}} \dots\dots\dots(10)$$

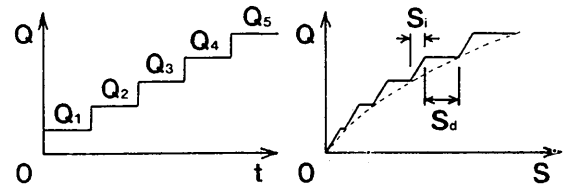
となる。式 (10) の示す意味は、一方向の規則的な繰返し軸荷重を受ける粘土中の杭の変位両振幅の大きさが、平均荷重値には無関係で荷重振幅の大きさにのみ依存し、繰返し載荷中常に一定となることである。変位振幅に関するこの性質については、3.3の実験結果の観察において、すでに確認した。

なお、本解析解の適用範囲は、杭の降伏値 ( $Q_y$ ) 以下の荷重領域である。

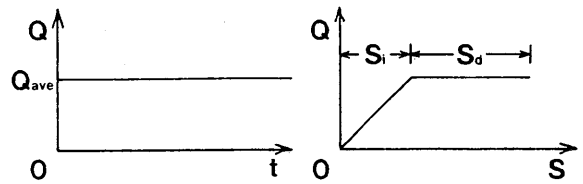
### 5. 解析解のパラメーターを求める実用的な方法

図一11 は杭に作用する典型的な軸方向荷重とその時の杭の応答を表した模式図である。図一11(a)～(c) の左側は杭に作用する荷重 ( $Q$ )～時間 ( $t$ ) 関係を、右側は杭の応答である荷重 ( $Q$ )～変位 ( $S$ ) 関係を示している。これらは、粘土中の杭を対象にした各種の載荷試験であり、冒頭で述べた静的載荷、クリープ載荷および繰返し載荷にそれぞれ対応する。

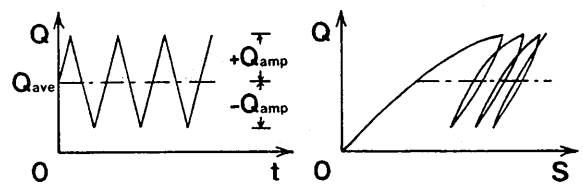
ここで前述の式 (1) (もしくは、図一11(c)) において荷重振幅 ( $Q_{amp}$ ) が小さくなる場合を想定すると、その極限において繰返し荷重は一定値 ( $= Q_{ave}$ ) (図一11(b)) となる。すなわち、クリープ載荷は繰返し載荷の特殊な場合に相当する。第4章で示した解析解は、クリープ載荷と繰返し載荷の上記の関係に着目し、クリープ(一定荷重)載荷における粘土中の杭の変位応答（図一11



(a) Static Loading



(b) Creep Loading



(c) Cyclic Loading

図一11 杭に作用する典型的な軸方向荷重とその時の杭の応答

(b) を表す以下の式を、繰返し載荷の場合に拡張したものである。

$$S = S_i + S_a$$

$$= \frac{a \cdot Q}{1 - b \cdot Q} + \frac{B_1 \cdot t_1 \cdot \exp(\beta \cdot Q)}{1 - n} \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^{1-n}$$

.....(11)

ここに、 $S$  は杭の変位、 $S_i$  は杭の即時変位、 $S_a$  は杭のクリープ変位、 $Q$  は杭に作用する一定荷重、他の記号は第4章の場合と同じである。第4章の解析解は式(11)の純然たる拡張なので、解の計算には式(11)に含まれる5つの変位パラメーター( $a, b, B_1, \beta, n$ )をそのまま用いることが可能であり、かつ他のパラメーターは一切必要としない。ゆえに、第4章の解析解のパラメーターを求めるには、式(11)のパラメーターを決定すればよい。前報<sup>1)</sup>の模型実験では、式(11)の右辺第二項に含まれるクリープ変位パラメーター( $B_1, \beta, n$ )を決定するため、数多くの杭のクリープ載荷試験を実施した。しかしながら、実際問題として現場で多くの杭に対してクリープ載荷試験を行うことは容易なことではない。そこで、以下では、式(11)に含まれる5つの変位パラメーターを求めるための実用的な方法を示す。

静的載荷試験は、図-11(a)(b)の比較より、段階的なクリープ載荷試験すなわちクリープ載荷の集合とみなすことができる。ゆえに、短期の杭のクリープ挙動は静的載荷試験結果から推定可能と考えられる。しかしながら、静的載荷過程の一部を形成する個々のクリープ載荷には、最初の載荷の場合を除き、それ以前の載荷履歴が含まれるので、静的載荷試験結果から杭のクリープ挙動を適切に評価するためには、この載荷履歴をうまく取り除く必要がある。既往の研究<sup>3)</sup>によれば、この問題は重ね合わせの方法を用いることによって、以下のように解決できる。

図-12は、静的載荷試験を行った際の杭の変位～時間曲線を表した模式図である。同図の点線は、任意の $Q_i$ なる荷重段階において、所定の載荷時間が過ぎても荷重を増減せずに載荷を継続したと仮定した場合の推定曲線を表している。ここで各荷重段階で共通の載荷時間 $t'$ を任意に選び、それぞれの $t'$ における変位量差 $\Delta S_i$

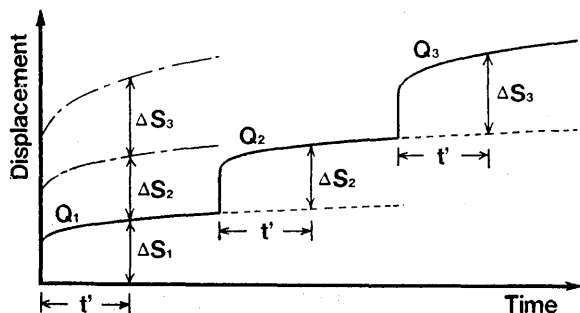


図-12 静的載荷試験の変位～時間曲線の重ね合わせの方法

を求めて累加すると、一点鎖線で示す曲線群を描くことができる。これらの一点鎖線は、もしも杭頭部に載荷重ゼロの状態から瞬間的に任意荷重 $Q_i$ を加えて変位の経時変化を観察したと仮定すれば、その時に得られるであろう変位～時間曲線に相当する。

図-12より、静的載荷試験結果から、そこで採用した荷重段階の数に相当する短期の杭のクリープ載荷試験結果が得られることがわかる。静的載荷試験で用いられる荷重段階数は通常8段階以上<sup>2)</sup>なので、1本の杭に静的載荷試験を実施するだけで、後述の6.1で示すように、式(11)（すなわち、第4章の解析解）に含まれる5つの変位パラメーターをすべて決定できる。通常の静的載荷試験から、極限荷重および降伏荷重と合わせて、繰返し荷重を受ける杭の変位応答計算に必要なパラメーターが求められるので好都合である。これらのパラメーターを決定する具体的な手順については、次の実験結果の解析において述べる。

## 6. 実験結果の解析

### 6.1 静的載荷試験

本節では、まず、図-12に示した重ね合わせの方法を適用することによって、静的載荷試験結果から履歴の影響を除いた杭の変位～時間曲線を求める。次に、これらの変位～時間曲線をもとに、式(11)に含まれる5つの変位パラメーターを決定する手順について述べる。

#### (1) 履歴の影響を除いた杭の変位～時間曲線

図-13(a)の太実線(0～900秒間)は、静的載荷試験(杭 No.2)の各荷重段階における変位～時間曲線の実測値である。同図の細実線(0～1800秒間)は、実測された各荷重段階の変位～時間曲線を指数クリープ曲線<sup>4)</sup>と仮定し、非線形最小二乗カーブフィッティング<sup>5)</sup>を行うことによって得られた推定曲線である(付録参照)。これらの推定曲線を用い、図-12の方法に従って重ね合わせを実施した結果(すなわち、履歴の影響を除いた変位～時間曲線)が図-13(b)である。図-13(a)

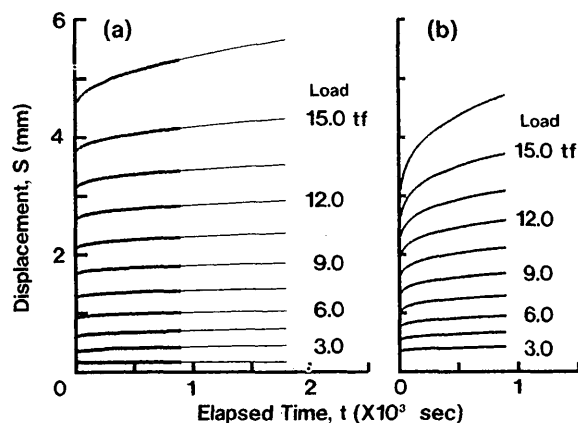


図-13 静的載荷試験(杭 No.2)の変位～時間曲線 ((a) 実測値と推定曲線, (b) 重ね合わせによる結果)

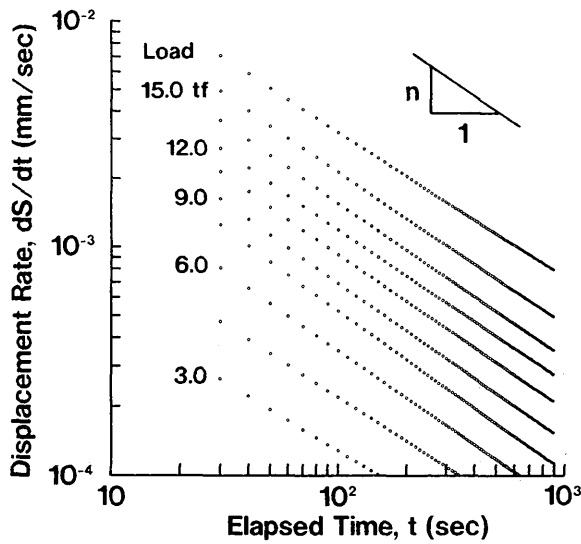


図-14 変位速度と経過時間の関係 (杭 No. 2)

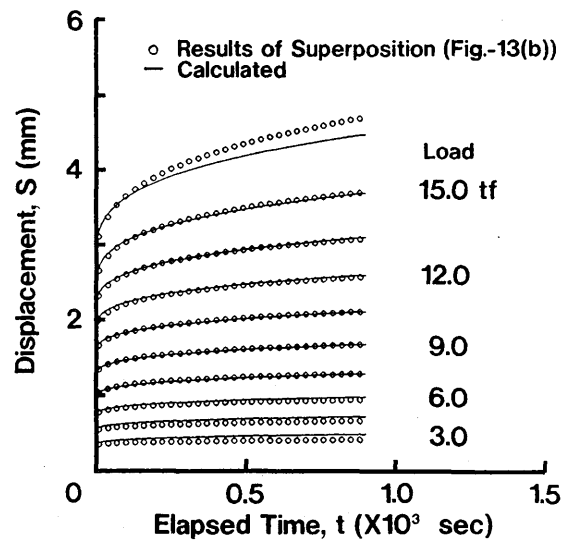


図-16 重ね合わせによる結果 (図-13(b)) と計算結果の比較

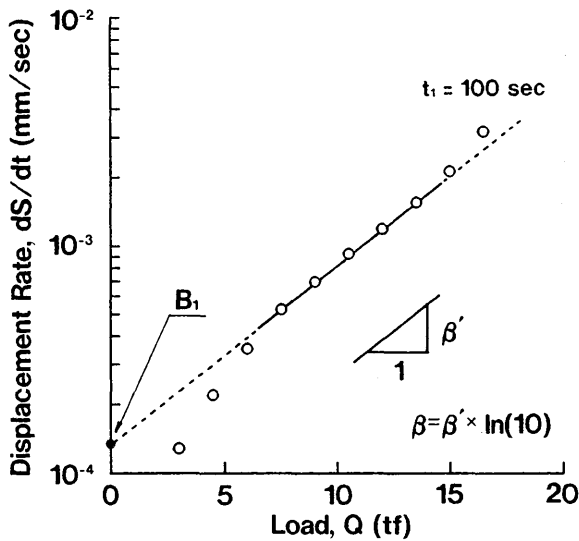


図-15 変位速度と荷重の関係 (杭 No. 2)

(b) の比較より、両者の変位応答は、荷重レベルが大きくなるにつれ、大きく異なることがわかる。なお、図-13(b) では省略したが、1.5 tf の荷重時の変位～時間曲線は、図-13(a) のものと同じである。この 1.5 tf の荷重時の変位～時間曲線は、ほぼ直線なので、以下で示すクリープ変位の解析 (図-14～16) では特に触れない。

(2) 杭の変位パラメーター

式 (11) を時間に関して微分し、杭のクリープ変位速度 ( $dS/dt$ ) を求めると、

$$dS/dt = B_1 \cdot \exp(\beta \cdot Q) \cdot (t_1/t)^n \dots \dots \dots (12)$$

となる。用いられている 3 つのクリープ変位パラメーター ( $B_1$ ,  $\beta$ ,  $n$ ) の定義は、式 (12) を以下のように書き直すことで理解できる。

$$\ln(dS/dt) = \ln(B_1) + \beta \cdot Q + n \cdot \ln(t_1) - n \cdot \ln(t) \dots \dots \dots (13)$$

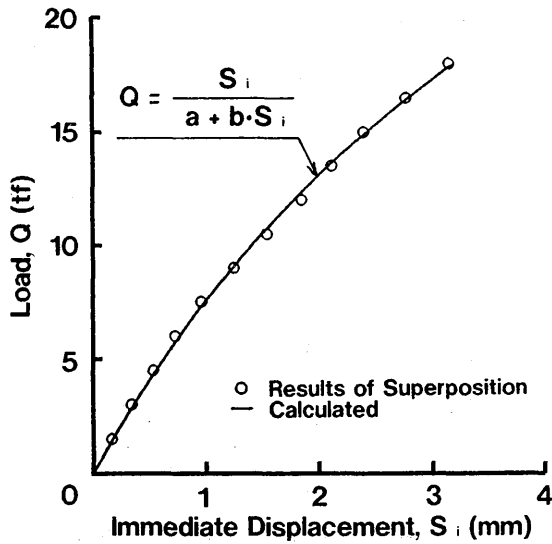
すなわち、 $-n$  はある値  $Q$  における  $\ln(dS/dt) \sim \ln(t)$  関係の傾きである。 $\beta$  は基準時間  $t_1$  における  $\ln$

( $dS/dt$ ) $\sim Q$  関係の傾きを表しており、 $\beta'$  が  $\log(dS/dt) \sim Q$  関係の傾きなら、 $\beta = \beta' \times \ln 10$  である。 $B_1$  は、 $\ln(dS/dt) \sim Q$  関係における切片であり、 $t = t_1$ ,  $Q = 0$  における仮想変位速度と定義される。

図-14～15 は、重ね合わせの方法によって得られた図-13(b) の結果から、上述の定義による杭のクリープ変位パラメーターを求めたものである。図-14 より、変位速度の対数は経過時間の対数に逆比例して減少し、その逆比例係数 ( $n$ ) はほぼ一定であることがわかる。また、図-15 より変位速度の対数と荷重の間に直線関係 (傾き  $\beta'$ ) が成立することがわかる。しかしながら、杭の降伏値 (=14.4 tf) を超える荷重領域と極限值 (=18.0 tf) の 1/3 程度以下の荷重領域では、この関係は成立していない。 $n$  と  $\beta$  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ので、式 (11) の適用範囲は、厳密に言えば、図-15 の実線で示された杭の降伏値以下の中間の荷重領域に限定されることに注意する必要がある。

図-16 は、式 (11) の右辺第二項によるクリープ変位の計算値と重ね合わせによる結果 (図-13(b)) を比較したものである。計算に用いたクリープ変位パラメーターは、図-14～15 から得られた値である。図-16 より、計算値と重ね合わせによる結果は、上述したように、図-15 の直線関係から大きく逸脱した領域の荷重の場合にはうまく対応しないものの、中間の荷重範囲では良く一致していることがわかる。

一方、式 (11) の右辺第一項で表される杭の即時変位のパラメーターも、クリープ変位の場合と同様、重ね合わせが成立するものと仮定することにより、静的載荷試験結果から求めることができる。すなわち、杭の即時変位は、図-13(b) に示した各荷重の経過時間ゼロにおける変位に対応し、重ね合わせを行う過程で自動的に計算される。図-17 はこの荷重と即時変位の関係を示し



図一七 荷重と即時変位の関係 (杭 No. 2)

表一 静的載荷試験結果から求めた杭の変位パラメーター

Pile No.	$B_1^*$ (mm/sec)	$\beta$ (1/1tf)	$n$	$a$ (mm/1tf)	$b$ (1/1tf)
2	$1.351 \times 10^{-4}$	0.182	0.68	$1.12 \times 10^{-1}$	$2.07 \times 10^{-2}$
6	$7.367 \times 10^{-5}$	0.197	0.67	$9.38 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^{-2}$

\* Reference Time  $t_1 = 100$  sec

たものである。荷重～即時変位応答を表す式 (11) の右辺第一項は双曲線モデル<sup>6)</sup>で表されているので、即時変位パラメーター ( $a, b$ ) は簡単に求められる。

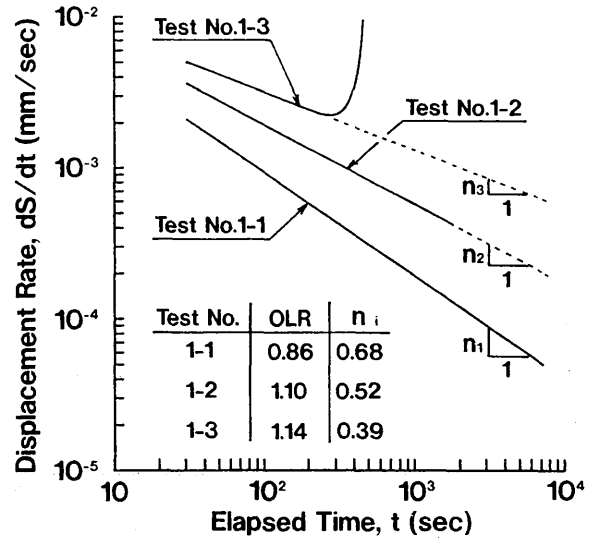
表一に、以上の手順によって、杭 No. 2 と杭 No. 6 の静的載荷試験結果から求めた杭の変位パラメーターの一覧を示す。

### 6.2 クリープ載荷試験

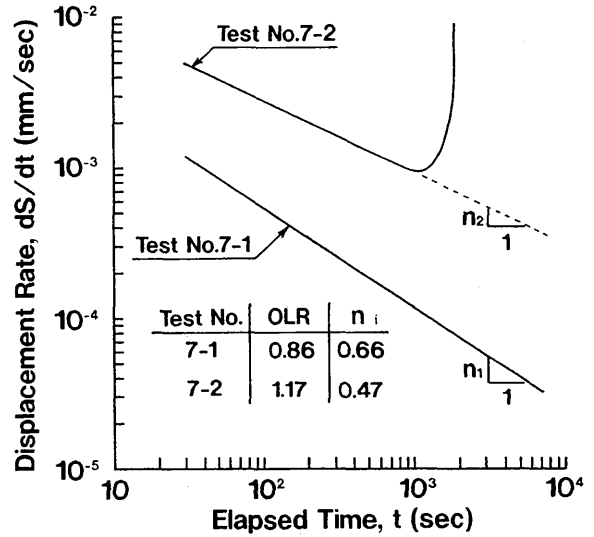
図一18～19は、クリープ載荷試験 (図一7の杭 No. 1, 杭 No. 7) における杭の変位速度と経過時間の関係を両対数上で表したものである。両図は、静的載荷試験結果の解析における図一14に対応する。

OLR < 1 の場合 (試験 No. 1-1 と 7-1) の傾き ( $n_1$ ) は、表一に示した静的載荷試験結果の解析で得られた値 ( $n$ ) にほぼ一致していることがわかる。このことはすなわち、上述の静的載荷試験結果の一連の解析が適切に行われたことの一端を示している。

一方、OLR > 1 の場合における傾き ( $n_2, n_3$ ) は、OLR < 1 の結果 ( $n_1$ ) に比較して、小さな値になっている。この傾きが小さいことは、変位速度が時間経過によって衰えにくいことを意味するので、OLR > 1 の杭では著しいクリープ変位が発生することを表している。さらに、破壊に至った場合 (試験 No. 1-3 と 7-2) の杭の変位速度は、時間経過とともに一旦減少していくものの、最小値を示してから増加に転じている。したがって、最終的に杭は、変位速度の大きさが無限大となり、破壊に至る。ここで観察されたこの最小変位速度は、粘土のク



図一八 変位速度と経過時間の関係 (杭 No. 1)



図一九 変位速度と経過時間の関係 (杭 No. 7)

リープ破壊<sup>7,8)</sup>に特有の最小ひずみ速度に対応するものである。

### 6.3 繰返し載荷試験

#### (1) 実測値と計算値の比較

ここでは、3.3で示した繰返し載荷試験結果と計算結果を比較することにより、第4章で示した解析解の妥当性を現場実験で検証する。解の計算に用いたパラメーターは、静的載荷試験結果の解析によって得られた値 (表一) である。なお、比較の対象は、4本の繰返し載荷試験杭において履歴の影響を含まないそれぞれの1回目の試験結果である。

図一20～23に実測値と計算値の比較を示す。実測値は、図一10に示す載荷開始直前のA点の変位 ( $S_0$ ) をゼロとし、繰返し載荷に伴う変位～時間応答曲線のみを示してある。計算値は、同様に  $S_0$  をゼロとして、式 (6) (7) より求めた結果である。計算には、敷地内の地盤性状の差異を考慮し、各々の繰返し載荷試験杭に近い方の静的載荷試験杭から得られたパラメーターを用いた。



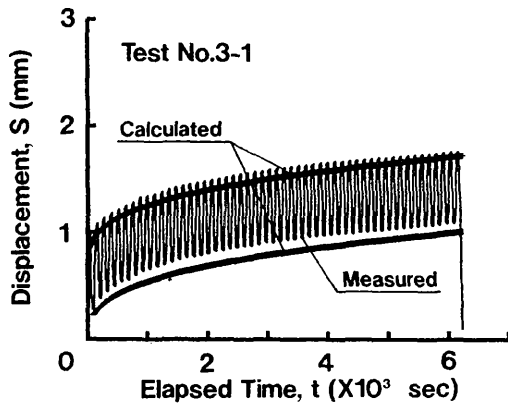


図-20 繰返し載荷試験 (No. 3-1) の実測値と計算値の比較

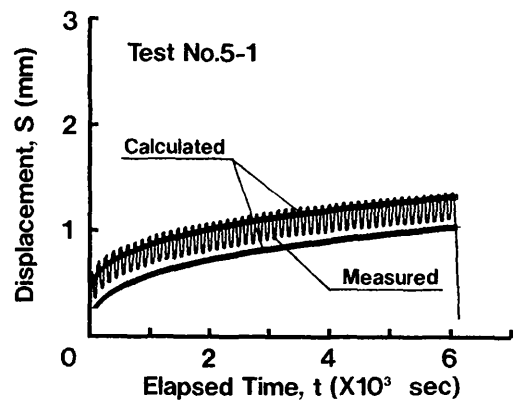


図-22 繰返し載荷試験 (No. 5-1) の実測値と計算値の比較

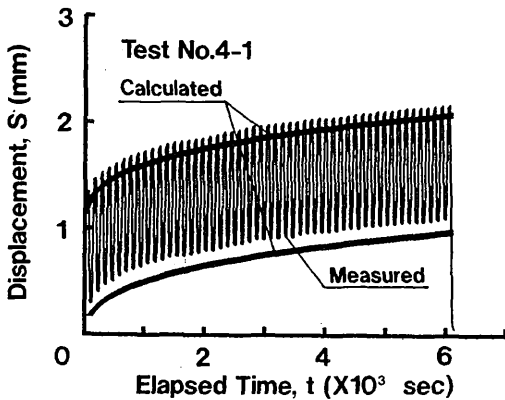


図-21 繰返し載荷試験 (No. 4-1) の実測値と計算値の比較

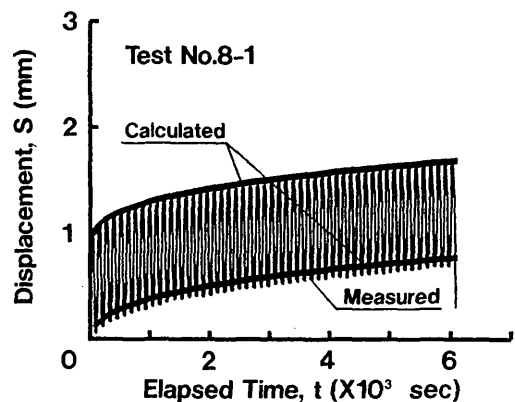


図-23 繰返し載荷試験 (No. 8-1) の実測値と計算値の比較

すなわち、試験 No. 3-1 と 4-1 に杭 No. 2 のパラメータを、試験 No. 5-1 と 8-1 には杭 No. 6 のパラメータを用いた。

図-20～23 より、累積変位の計算値は種々の荷重条件における実測値をうまく追跡できることがわかる。また、変位両振幅の実測値は、荷重振幅の値が一定であるので式 (10) で示されるように、繰返し載荷中常に一定となっており、その大きさは計算値と良い対応を示している。したがって、第 4 章の解析解によって、規則的な繰返し引抜き荷重を受ける粘性土中の杭の変位応答は、静的載荷試験結果から十分な精度で予測できることがわかる。

## (2) 本解析解の適用性

第 4 章の解析解の適用範囲は、厳密にはこの解のペースである式 (11) が成立する中間の荷重領域 (6.1 (2) 参照) であるが、近似的に杭の降伏値以下の荷重領域全体と考えることが可能である<sup>1)</sup>。ゆえに、上記の 4 つの実測値が計算値と良い一致を示したのは、試験 No. 8-1 の場合を除き、いずれも  $OLR < 1$  の条件であったためである。なお、地盤性状の差異 (3.3 参照) を考慮すると、試験 No. 8-1 も実質的には  $OLR < 1$  の条件と推察される。

一方、3.3 の実験結果からわかるように、 $OLR > 1$  の繰返し荷重下の杭は著しい累積変位を生じ、甚だしい場合には破壊に至る。しかしながら、本解析解はその性質

上、いくら繰返し荷重レベルが大きくても、またいくら載荷時間が増えても計算上の変位は有限値を示し、杭の破壊を表現することはできない。ゆえに、本解析解を適用するにあたっては、この点に注意することが必要である。

## 7. 結論

粘性土地盤に打ち込まれた 8 本の鋼管杭に実施した各種の引抜き載荷試験結果とそれに対する解析結果より、以下の結論を得た。

- ① 規則的な繰返し引抜き荷重を受ける粘性土中の杭の変位振幅の大きさは、杭が破壊するしないにかかわらず、常に一定である。
- ② 降伏荷重を超える繰返し引抜き荷重が作用すると、粘性土中の杭は著しい累積変位を生じ、甚だしい場合には破壊に至る。一方、降伏荷重以下であれば、累積変位は比較的小さく破壊の兆候は見られない。
- ③ 第 4 章で示した解析解は、規則的な繰返し引抜き荷重を受ける粘性土中の杭の変位応答計算方法として有効である。
- ④ 静的載荷試験結果から、杭の極限荷重および降伏荷重とともに、上記の変位応答計算に必要なパラメータを求めることができる。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、千葉大学工学部上杉守道

助教授の助言を受けました。記して謝意を表します。

付 録

既往の研究<sup>4),9)</sup>によれば、一定軸荷重を受ける粘土中の杭の変位 ( $S$ )~時間 ( $t$ ) 曲線 (クリープ曲線) には、以下の2種類がある。

$$S = S_i + U \cdot \ln(t) \dots \dots \dots (A1)$$

$$S = S_i + V \cdot t^W \dots \dots \dots (A2)$$

ここに、 $S_i$ は杭の即時変位、 $U, V, W$ は定数である。式(A1)は、杭の変位が時間の対数に対して直線的に増加する場合(対数クリープ曲線)を表しており、村山・柴田<sup>9)</sup>によって提案されたものである。一方、式(A2)は、杭の変位が時間とともに指数的に増加する場合(指数クリープ曲線)を表しており、Edilら<sup>4)</sup>によって提案されている。

時間を対数にとった片対数上で、対数クリープ曲線は上述のように直線となるが、指数クリープ曲線は依然として曲線である。したがって、実際に得られた杭の変位~時間曲線がどちらのクリープ曲線に相当するかを見分けることは比較的簡単である。その結果、本実験で得られた各荷重段階の実測値(図-13(a)の太実線)は、指数クリープ曲線(式(A2))と判定された。

推定曲線(図-13(a)の細実線)を求めることは、上述の実測値をもとに、式(A2)における $V, W$ の最適値を各荷重段階ごとに決定することである。これには、Caceciら<sup>5)</sup>の論文に掲載されているパソコン用の非線形最小二乗カーブフィッティングのプログラムを用いた。このプログラムは、Simplex法と呼ばれる算法をベースにしたものである。詳細については、文献5)を参照されたい。

このプログラムでは繰返し計算を必要とし、その過程における結果は以下のように表される。

$$\begin{vmatrix} V_{N-2} & W_{N-2} & SSR_{N-2} \\ V_{N-1} & W_{N-1} & SSR_{N-1} \\ V_N & W_N & SSR_N \end{vmatrix}$$

ここに、 $V, W$ はフィッティング定数の計算値、 $SSR$ は残差平方和であり、添字の $N$ は繰返し回数を表す。

繰返し計算の収束条件は、以下のようである。

① 上記の3つ( $V_N, V_{N-1}, V_{N-2}$ )の中から最高値( $V_H$ )と最低値( $V_L$ )を見つけだす。

②  $V_H$ と $V_L$ に対して以下の照査を行う。

$$\frac{V_H - V_L}{V_H} < 10^{-6} \dots \dots \dots (A3)$$

③ 同様の操作(①~②)を $W$ についても行う。

④ 同様の操作(①~②)を $SSR$ についても行う。

⑤  $V, W, SSR$ がともに式(A3)に示された条件を満足す

れば、繰返し計算は終了する。なお、式(A3)の値( $10^{-6}$ )は、Caceciら<sup>5)</sup>によって推奨されているものである。

⑥ もしくは、所定の繰返し回数( $N$ )に達したら計算を終了する。Caceciら<sup>5)</sup>によれば、繰返し計算はおおむね $20 \times m^2$ より少ない回数で収束するとのことである。ここに、 $m$ はフィッティング定数( $V, W$ )の数(=2)である。本研究では、 $N=300$ とした。

最終的に、フィッティング定数( $V, W$ )の計算値は、以下のように得られる。

$$V = \frac{V_N + V_{N-1} + V_{N-2}}{3} \dots \dots \dots (A4)$$

$$W = \frac{W_N + W_{N-1} + W_{N-2}}{3} \dots \dots \dots (A5)$$

参考文献

- 1) 稲 国芳, 岸田英明: 繰返し軸荷重を受ける粘土中の杭の変位応答, 日本建築学会構造系論文報告集, 第435号, pp.71~80, 1992
- 2) 土質工学会: クイの鉛直載荷試験基準・同解説, 土質工学会, 1972
- 3) 柴田 徹: 粘土のレオロジーとその応用, 土と基礎, 土質工学会, Vol.13, No.7, pp.48~54, 1965
- 4) Edil, T.B. and Mochtar, I.B.: Creep Response of Model Pile in Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.114, No.11, pp.1245~1260, 1988
- 5) Caceci, M.S. and Cacheris, W.P.: Fitting Curves to Data, The Simplex Algorithm is the Answer, BYTE, May, pp.340~362, 1984
- 6) Chin, F.K.: Estimation of the Ultimate Load of Piles from Tests not Carried to Failure, Proc., 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, pp.81~90, 1970
- 7) Finn, W.D.L and Shead, D.: Creep and Creep Rupture of an Undisturbed Sensitive Clay, Proc., 8th ICSMFE, Vol.1, pp.135~142, 1973
- 8) Vaid, Y.P. and Campanella, R.G.: Time-Dependent Behavior of Undisturbed Clay, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.113, No. GT7, pp.693~709, 1977
- 9) 村山朗郎, 柴田 徹: 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, 1958

(1992年3月10日原稿受理, 1992年5月28日採用決定)