繰返し軸荷重を受ける粘土中の杭の安定条件

DESIGN GUIDELINES ON PILES IN CLAY UNDER CYCLIC AXIAL LOADING

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

A stability diagram is proposed for the design of piles in clay under cyclic axial loading. The diagram represents the allowable combination of average load (Q_{ave}) and cyclic load amplitude (Q_{amp}). The boundary lines between stable and unstable zones are defined by the following relations: (1) $Q_{max} \leq Q_y$; (2) $2Q_{amp} \leq Q_y$; where Q_{max} is the maximum value of cyclic load ($= Q_{ave} + Q_{amp}$) and Q_y is yield load obtained by pile load tests. The diagram is compared with the results of field and laboratory tests reported in the literature.

Keywords: pile, clay, cyclic load, stability
杭, 粘土, 繰返し荷重, 安定

1. はじめに

筆者らはこれまでに、一方向の規則的な繰返し軸荷重（以後、軸荷重は荷重と呼ぶ）を受ける粘土中の杭の変位応答の解析解¹⁾を提案し、その妥当性を模型実験¹⁾および現場実験²⁾で検証してきた。その結果によれば、一方向の規則的な繰返し荷重を受ける粘土中の杭の安定は、繰返し荷重の最大値を降伏荷重以下に制限することで確保することができる。しかしながら、杭には、一方向だけではなく、二方向の繰返し荷重が作用する場合がある。

Karlsrud ら³⁾は、粘土地盤中に圧入された鋼管杭に対して数多くの一方向と二方向の繰返し載荷試験を行っている。これらの結果は、一方向の場合に比べて、二方向の繰返し載荷は杭の支持力に著しい影響を及ぼすことを示している。一方、Poulos⁴⁾は、繰返し荷重を受ける杭の問題を簡易化された境界要素法を用いて解析的に扱うことを試みている。また、Malek ら⁵⁾は、杭周辺の土要素のせん断変形モードが単純せん断試験機でシミュレートできることに着目し、繰返し荷重を受ける杭の挙動を粘土の繰返し非排水単純せん断試験結果をもとに論じている。

上述のように、二方向の繰返し荷重を受ける粘土中の杭に関する既往の研究^{3)~5)}では種々のアプローチが用いられてきたが、その問題が複雑であるため、いずれも実用的な設計法を提言するまでには至っていないのが現状である。

本研究は、一方向の場合に関するこれまでの結果^{1), 2)}をもとに、二方向の繰返し荷重に対する杭の安定条件について考察し、繰返し荷重を受ける粘土中の杭の実用的な設計指針を提案したものである。ただし、ここでいう粘土中の杭とは、いわゆる粘土中の摩擦杭のことである。

以下では、まず、一方向と二方向の規則的な繰返し荷重を受ける粘土中の杭の典型的な挙動について述べる。次に、既往の粘土の繰返し試験結果を援用することによって二方向の繰返し荷重に対する杭の安定条件について議論し、得られた条件を既往の実験データと比較する。

なお、本論で提案する安定条件は、多くの回数に達する繰返し荷重を受ける杭（たとえば、波浪を受ける海洋構造物の杭）を念頭において作成されたものである。したがって、本安定条件は、我が国の主要な検討対象である地震時の繰返し荷重を受ける杭に対しては、概して控えめである。すなわち、繰返し回数の比較的小さい地震時の場合には、この条件を超える繰返し荷重が作用しても、必ずしも杭は破壊に至るとは限らない。しかしながら、地震時の場合、どの程度までこの条件を緩和できるかの問いに的確に答えることは、現状では難しい。ゆえに、本論で提案する杭の安定条件は、今後のこの種の研究の進展に応じて緩和されるべき性質を有するものである。

2. 典型的な杭の繰返し挙動

一方向と二方向の繰返し載荷では、粘土中の杭は異

* ジオトップ

** 東京工業大学 教授・工博

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

表—1 模型杭の繰返し载荷条件

Test No.	Cyclic Test	Q_{ave}/Q_y^*	Q_{amp}/Q_y^*	Q_{max}/Q_y^*	Q_{min}/Q_y^*	T^{**} (sec)	N^{***}	Load Shape	Results
1	One-way	0.84	0.25	1.09	0.59	28.6	70	Triangular	Failure
2	One-way	0.69	0.25	0.94	0.44	28.6	2059	Triangular	No Failure
3	Two-way	0.06	0.89	0.95	-0.83	25.2	30	Sinusoidal	Failure
4	Two-way	0.06	0.48	0.54	-0.42	25.2	500	Sinusoidal	No Failure

* Yield Load ** Period *** Number of Cycles

図—1 一方向の規則的な繰返し荷重を受ける杭の荷重～変位曲線（試験 No.1 と No.2）

なった応答を示すことが知られている³⁾。本章では、この違いを調べるために実施した模型実験（表—1）の典型的な結果について述べる。なお、模型杭の杭径は 19 mm である。実験手順等の詳細については前報¹⁾を参照されたい。

杭に作用する繰返し荷重 (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に表せる。

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

ここに、 Q_{ave} は平均荷重、 Q_{amp} は荷重振幅、 T は周期である。式 (1) は、 $Q_{ave} \geq Q_{amp}$ の場合には一方向の繰返し荷重を、 $Q_{ave} < Q_{amp}$ の場合には二方向の繰返し荷重を表す。また、繰返し荷重の最大値 (Q_{max}) と最小値 (Q_{min}) は、以下ようになる。

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

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

したがって、表—1 の繰返し载荷条件は、これらの荷重項で表してある。さらに、一方向（試験 No.1 と No.2）と二方向（試験 No.3 と No.4）の繰返し载荷における地盤強度（地盤作製時の圧密圧力）は異なるので、それぞれの荷重項は静的载荷で得られた杭の降伏荷重 (Q_y) で正規化してある。ここでいう静的载荷とは、杭に段階的に荷重を作用させ、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。なお、言うまでもなく、降伏荷重の値には、杭材の特性、杭の設置方法および杭を支える地盤の特性がすべて反映される。

2.1 一方向の繰返し载荷

図—1 は、一方向の繰返し载荷（試験 No.1 と No.2）

における杭の荷重～変位曲線である。繰返し荷重は降伏荷重で正規化してあり、試験 No.1 に示した数字は繰返し回数を意味している。いずれも、荷重振幅、周期および荷重波形は同一であり、平均荷重の大きさだけが異なっている。試験 No.1 の杭では、荷重～変位曲線は繰返し回数が 30～40 回付近までは収束の気配を示したものの発散に転じ、70 回の繰返しで破壊している。一方、試験 No.2 の杭では、荷重～変位曲線は収束し続け、2059 回の繰返し（時間に換算して約 16 時間）においても破壊の兆候は見られない。

図—2 は、試験 No.1 と No.2 における杭の変位～時間曲線である。繰返し変位両振幅の大きさは、破壊間際の不安定な部分を除き、いずれも繰返し载荷中常に一定

図—2 一方向の規則的な繰返し荷重を受ける杭の変位～時間曲線（試験 No.1 と No.2）

図—3 二方向の規則的な繰返し荷重を受ける杭の荷重～変位曲線（試験 No. 3）

図—4 二方向の規則的な繰返し荷重を受ける杭の荷重～変位曲線（試験 No. 4）

図—5 二方向の規則的な繰返し荷重を受ける杭の変位～時間曲線（試験 No. 3 と No. 4）

である。また、両者の繰返し変位両振幅の大きさは、荷重振幅（ $Q_{amp}/Q_y=0.25$ ）の大きさが同じであるので、等しいことがわかる。上述のように、変位両振幅の大きさは繰返し荷重中常に一定なので、図—2 より、一方向の規則的な繰返し荷重を受ける粘土中の杭が破壊に至る場合には、累積変位の成長による破壊モードとなることかわかる。

なお、一方向の規則的な繰返し荷重を受ける粘土中の杭のこのような変位応答は、筆者ら²⁾や他の研究者^{3), 6), 7)}による現場実験でも確認されている。

2.2 二方向の繰返し荷重

図—3～4 は、二方向の繰返し荷重（試験 No. 3 と No. 4）における杭の荷重～変位曲線である。繰返し荷重は、一方向の場合と同様、降伏荷重で正規化してある。いずれも、平均荷重、周期および荷重波形は同一であり、荷重振幅の大きさだけが異なっている。試験 No. 3 の杭は 30 回の繰返し荷重で破壊しているものの、試験 No. 4 における杭の荷重～変位曲線はほとんど変化していない。

図—5 は、試験 No. 3 と No. 4 における杭の変位～時間曲線である。同図より、試験 No. 3 の杭は、変位両振幅の大きさが繰返し回数とともに成長することによって安定性を失い、最終的に破壊に至っていることがわかる。

一方、試験 No. 4 の杭では、500 回の繰返し荷重（時間に換算して 3.5 時間）においても変位両振幅の大きさはほとんど変わらなかったもので、途中で荷重を中止した。いずれも平均荷重の大きさがほぼゼロであるので、一方向の繰返し荷重の場合と対照的に、累積変位はほとんど生じていない。

なお、二方向の規則的な繰返し荷重を受ける粘土中の杭のこのような変位応答は、他の研究者³⁾による現場実験でも確認されている。

3. 繰返し荷重を受ける杭の安定条件

3.1 一方向の繰返し荷重を受ける杭の安定図

筆者らのこれまでの研究結果^{1), 2)}によれば、一方向の繰返し荷重を受ける粘土中の杭の安定を確保するには、図—1 からわかるように、繰返し荷重の最大値を降伏荷重以下に制限すればよい。このことを繰返し荷重を受ける杭の安定図^{3), 4)}上で表すと、図—6 のようになる。繰返し荷重を受ける杭の安定図とは、杭に許容できる繰返し荷重の平均値（ Q_{ave} ）と振幅（ Q_{amp} ）の相互関係を表したものである。

繰返し荷重の最大値（ Q_{max} ）が降伏荷重（ Q_y ）以下であるための条件は、式（2）を用いると、以下のように表せる。

図—6 一方向の繰返し荷重を受ける粘土中の杭の安定図

$$\frac{Q_{ave}}{Q_y} + \frac{Q_{amp}}{Q_y} \leq 1 \dots\dots\dots (4)$$

また、一方向の繰返し荷重という条件 ($Q_{ave} \geq Q_{amp}$) より、以下の関係式が得られる。

$$\frac{Q_{ave}}{Q_y} - \frac{Q_{amp}}{Q_y} \geq 0 \dots\dots\dots (5)$$

したがって、粘土中の杭に対する一方向の繰返し荷重の許容範囲として、式(4)と式(5)より、図—6のハッチ部分が得られる。

図—6の4つの丸印は、第2章で述べた模型実験の繰返し荷重条件(表—1)をプロットしたものである。●印は杭が破壊に至ったことを、○印は破壊には至らなかったことを意味する。試験 No. 3 (図—3)の杭は、上述の式(4)の条件 ($Q_{max} \leq Q_y$) を満足するにもかかわらず、わずか30回の繰返しで破壊している。一方、試験 No. 3 とほぼ同じ大きさの最大荷重比 (Q_{max}/Q_y) である試験 No. 2 (図—1)の杭では、2000回以上の繰返しにおいても破壊の兆候は見られない。このことは、二方向の繰返し荷重を受ける粘土中の杭には、一方向の場合とは別の安定条件を設定することが必要であることを示している。本章の以下では、この条件について考察する。

3.2 二方向の繰返し荷重を受ける杭の安定条件

第2章で述べたように、粘土中の杭は一方向と二方向の繰返し載荷では異なった応答を示すので、一方向の場合の安定条件を単純に適用するだけでは、上述のように、二方向の場合(図—3)の杭の破壊挙動をうまく説明することはできない。

二方向の繰返し載荷が一方向の場合と本質的に異なる点は、作用する繰返し荷重の方向が交互に逆転すること、すなわち杭を支える粘土はせん断応力の逆転を経験することにある。したがって、二方向の繰返し載荷の場合に

は、土の繰返し特性に及ぼす応力逆転の効果に関する情報が必要である。しかしながら、応力逆転の効果の重要性⁸⁾は認識されているものの、応力の逆転によって土の繰返し強度特性は顕著な影響を受けるという定性的な内容以上のものは、いまだに明らかにされていない。

従来より杭の分野では、このような土の挙動の複雑さに起因する困難な問題は、実際に載荷試験を行ってみることで現実的な解決がなされてきた。実物実験である杭の載荷試験は、主にその静的な支持力を求めるため、今日でもしばしば実施されている。しかしながら、二方向の繰返し試験には載荷方法や反力の確保等に多大の費用と労力を必要とするため、静的な支持力を求める場合と同じような個々のケースに応じた杭の繰返し試験を行うことは容易なことではない。

そこで、以下では、杭に加えられた繰返し荷重はそれを支える土に繰返しせん断力として作用することに着目し、既往の粘土の繰返し試験結果を援用することによって、二方向の繰返し荷重を受ける粘土中の杭(摩擦杭)の安定条件について検討する。

(1) 前提条件

検討の前提として、以下の①～③を仮定する。

- ① 粘土中の杭の先端抵抗力は無視し得るほど小さい。
- ② 杭の周面抵抗力はそれを支える粘土のせん断抵抗力として発揮される。
- ③ 粘土中の杭は押込み側と引抜き側で同じ応答を示す。すなわち、押込み側と引抜き側では降伏荷重(あるいは極限荷重)の大きさは等しい。

①は、杭長が短い場合を除き、実用上許される仮定と考えられる。また、杭の表面が極めて滑らかな場合は杭と粘土の境界面で滑りが発生する⁹⁾可能性があるが、引抜かれた杭の全面に粘土が付着していたとの報告^{10), 11)}を考慮すると、実際の杭では②の仮定が満たされると考えられる。さらに、粘性土中の杭に関する最近の実験的研究^{12)~15)}は、③の仮定がほぼ成立することを示している。以上により、通常の粘土中の杭では、上記の仮定がほぼ満足されることができると考えることができる。

(2) 繰返し応力を受ける粘土の挙動

粘土の繰返し試験結果は、上述の仮定が満足される粘土中の杭の繰返し挙動を解明するための有用な手段と考えられる。ここでは、既往の粘土の繰返し試験結果について述べる。

Sangrey ら¹⁶⁾は、飽和粘土に対して一連の一方向繰返し非排水三軸試験を行っている。これらの結果は、通常の静的強度以下の応力であっても繰返し作用すると試料は破壊に至るが、繰返し回数をいくら増やしても破壊に至ることはない応力の限界値(Critical Level of Repeated Loading: CLRL)が存在することを示している。すなわち、この限界値を超えない応力レベルのもとでの

図一七 一方向と二方向の非破壊応力限界値の模式図
(試験結果は、Conn ら^{24), 25)}による)

繰返しでは、回数を増やしてももはやそれ以上有効応力および軸ひずみが増えない平衡状態が現れる。同様の非破壊応力限界値の存在は、多くの研究者^{17)~21)}によって報告されている。

二方向の繰返し試験においても、一方向の場合と同様、粘土には非破壊応力の限界値が存在することが報告されている。数少ない二方向の例^{5), 22), 23)}は、主に単純せん断試験による非排水条件で、初期せん断応力をゼロとする対称的な繰返しによる試験である。これらの試験結果はいずれも、正規圧密試料の非破壊応力限界値は静的強度の4割程度であることを示している。

一方、Conn ら^{24), 25)}は、繰返し非排水三軸試験において、一方向と二方向の粘土の非破壊応力限界値を比較した結果を報告している。一方向の結果は最小応力をゼロとした圧縮側への繰返しで得られた値であり、二方向の結果は初期せん断応力をゼロとした対称的な繰返しで得られた値である。図一七は正規圧密試料の結果を模式的に表したものである。ただし、試験結果は静的強度(c_u)で正規化してある。同図より、二方向の限界値($CLRL_2$)は一方向の限界値($CLRL_1$)よりはるかに小さいことがわかる。しかしながら、一方向の限界値の応力振幅($\tau_1 = 0.28 \cdot c_u$)と二方向の限界値の応力振幅($\tau_2 = 0.29 \cdot c_u$)を比較すると、両者はほぼ同じ値である。Conn ら²⁴⁾は、この結果をもとに、応力振幅は土の繰返し応答を決定する重要な要因であることを示唆している。

(3) 繰返し荷重を受ける杭の安定図

上述の粘土の繰返し試験結果は、粘土中の杭の安定を

確保するには、繰返し荷重の最大値に対してだけではなく、荷重振幅の大きさに対しても制限を設けることが必要であることを示している。繰返し荷重の最大値に対する制限は、式(4)で示したように、一方向の繰返し荷重を受ける杭の安定に必要なものである。一方、荷重振幅の大きさに対する制限は、前述の図一三~五の実験結果からわかるように、二方向の繰返し荷重を受ける杭の安定にとって重要な条件となる。

言うまでもなく、繰返し荷重を受ける杭の近傍の粘土の挙動は、明確な境界条件(排水条件)のもとで行われた粘土の繰返し試験とは異なる可能性がある。しかしながら、粘土の繰返し試験における一方向と二方向の応力振幅の関係(図一七)は、同じ境界条件のもとで得られた結果であるので、粘土中の杭の場合に対しても適用可能と考えられる。すなわち、二方向の繰返し荷重を受ける粘土中の杭に対する荷重振幅(Q_{amp})の制約条件は、図一七の実験結果から、以下のように設定することが有効であることが推定できる。

$$Q_{amp} \leq Q_{amp}^* \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Q_{amp}^* は一方向の場合に許容できる荷重振幅の最大値である。式(6)の関係を採用すれば、二方向の繰返し荷重に対する杭の安定条件は、図一六から簡単に求めることができる。すなわち、一方向の場合に許容できる荷重振幅の最大値(Q_{amp}^*)は、図一六の⊗点の条件から、以下のように得られる。

$$Q_{amp}^* = 0.5 \cdot Q_y \quad \dots\dots\dots (7)$$

したがって、式(6)と式(7)より、二方向の繰返し荷重を受ける粘土中の杭に対する荷重振幅(Q_{amp})の制約条件は、以下ようになる。

$$\frac{Q_{amp}}{Q_y} \leq 0.5 \quad \dots\dots\dots (8)$$

なお、二方向の繰返し荷重という条件($Q_{ave} < Q_{amp}$)か

図一八 繰返し荷重を受ける粘土中の杭の安定図

らは、以下の関係式が得られる。

$$\frac{Q_{ave}}{Q_u} - \frac{Q_{amp}}{Q_u} < 0 \quad (9)$$

以上により、一方向の場合(図-6)に式(8)と式(9)の関係を書き加えると、繰返し荷重を受ける粘土中の杭の全体の安定荷重領域は、図-8のハッチ部分となる。

4. 既往の実験データとの比較

本章では、図-8に示した繰返し荷重を受ける粘土中の杭の安定条件を既往の実験データと比較し、その妥当性を検討する。比較のための実験データは、冒頭で述べた3つの既往の研究論文^{3)~5)}から引用したものである。

4.1 単純せん断試験⁵⁾

図-9は、Malek ら⁵⁾の報告による応力制御方式の繰返し非排水単純せん断試験結果である。試験に用いられた試料は正規圧密粘土(Boston Blue Clay)である。試験結果は静的強度(c_u)で正規化された平均せん断応力比(τ_{ave}/c_u)と繰返しせん断応力比(τ_c/c_u)の関係で与えられている。丸印は $\tau_{ave} \neq 0$ の繰返しせん断試験を、四角印は $\tau_{ave} = 0$ の繰返しせん断試験を意味する。なお、これらの応力比と杭の荷重比とは、以下のように対応すると考えることができる。

$$\tau_{ave}/c_u \rightarrow Q_{ave}/Q_u$$

$$\tau_c/c_u \rightarrow Q_{amp}/Q_u$$

ここに、 Q_u は杭の極限荷重である。

正規化の基準値である静的強度(c_u)はひずみ制御による試験で求められているので、図-8で必要な杭の降伏荷重に相当する粘土の降伏応力(τ_y)を知ることはできない。しかしながら、Malek ら⁵⁾は、 $\tau_{ave} = 0$ の二方向の繰返しせん断試験において、それ以下では粘土が破壊することはない限界応力として以下の値を提示している。

$$\tau_c/c_u \doteq 0.4 \quad (10)$$

図-9 正規圧密粘土の非排水繰返し単純せん断試験結果 (Malek ら⁵⁾によるものに一部加筆)

したがって、図-8および式(10)より、粘土の降伏応力(τ_y)は以下のように推定される。

$$\tau_y/c_u \doteq 0.8 \quad (11)$$

図-9の点線は、式(10)と式(11)によって得られた粘土の安定応力領域の境界線である。二方向の繰返しせん断領域の結果は、式(10)の根拠をなすものである。良い一致を示すのは当然であるが、一方向の繰返しせん断領域の結果はうまく対応していない。これは、Malek ら⁵⁾が繰返しせん断応力(τ_c)を非排水条件で作用させる前に平均せん断応力(τ_{ave})を排水条件で試料に作用させたため、 τ_{ave} が大きな試料ほどより大きな強度を有することによると考えることができる。すなわち、個々の試料を τ_{ave} が作用した後の実際の強度で正規化してやると、 τ_{ave} が大きな試験結果ほど図-9上で原点に向かってシフトする量が大きくなる。

以上を考慮すると、図-9の繰返し単純せん断試験結果は、本論で提案する安定条件(図-8)によってうまく解釈できるであろうことが推定される。

4.2 NGIの実験³⁾

Karlsrud ら³⁾は、一様な粘土地盤中に圧入された鋼管杭(杭径15.3 cm, 杭長5.15 m, 肉厚4.5 mm)に対する一連の繰返し載荷試験結果を報告している。試験は、規則的な繰返し荷重の平均値(Q_{ave})と振幅(Q_{amp})の種々の組み合わせにより、一方向と二方向の繰返し荷重領域で行われている。なお、一方向の繰返し荷重領域は、引抜き側である。

図-10は、後述の図-11の結果から、Karlsrud ら³⁾によって選定された一方向の繰返し載荷試験結果である。この結果は $Q_{min}/Q_u \doteq 0.05$ のデータのみを集めたものである。なお、図中の丸、三角および四角の記号の意味は、原論文³⁾中で説明されていないので、不明である。同図より、一方向の規則的な繰返し荷重を受ける粘土中の杭には、それ以下では破壊に至ることはない限界

図-10 NGIによる杭の一方向繰返し載荷試験結果 (Karlsrud ら³⁾による)

図-11 NGIによる杭の繰返し載荷試験結果
(Karlsrud ら³⁾によるものに一部加筆)

荷重が存在すること、およびその大きさは $Q_{max}/Q_u \approx 0.7$ であることがわかる。

一方向の規則的な繰返し荷重を受ける粘土中の杭の安定を確保するには、繰返し荷重の最大値を降伏荷重以下にすればよいことを述べた。すなわち、 $Q_{max} \leq Q_y$ である。したがって、この関係と上述の図-10の限界荷重の関係から、この現場における杭の降伏荷重 (Q_y) と極限荷重 (Q_u) の関係が、以下のように推定できる。

$$Q_y \approx 0.7 \cdot Q_u \quad (12)$$

図-11は、安定図上にプロットされた一方向と二方向の繰返し載荷試験結果である。ただし、縦軸 (Q_{amp}) と横軸 (Q_{ave}) は、本論で用いた杭の降伏荷重 (Q_y) ではなく、極限荷重 (Q_u) で正規化されている。この極限荷重は、破壊に至るまで約20分を要した比較的短い載荷時間で得られた値である。図-11の3つの曲線は、杭が破壊に至るまでに要する繰返し回数 (N_f) を表しており、Karlsrud ら³⁾によって書込まれたものである。

一方、図-11の点線は、式(12)の関係をもとに、杭の安定荷重領域(図-8)の境界線を示したものである。一方向の繰返し荷重領域の一部で差異が見られるものの、安定荷重領域内で破壊に至った杭は皆無である。したがって、図-11より、本論で提案する杭の安定条件は、これらの実験結果と矛盾することはないことがわかる。

4.3 Poulos⁴⁾の収集データ

図-12は、Poulos⁴⁾によって収集された繰返し載荷試験結果である。試験結果は安定図上で提供されており、図中の記号「F」は繰返し載荷によって杭が破壊に至ったことを意味している。

繰返し載荷試験結果は種類の異なるすべての杭について極限荷重で正規化してあるので、本論の安定図(図-8)に必要な杭の降伏荷重 (Q_y) を個々に知ることは困難である。しかしながら、図-12には上述のNGI³⁾の実

- Tests with no failure for $N > 10,000$
- △ F Test with failure at $N = 564$
- Tests of Puesch(1982) - no failure
- × Stevens(1978) - no settlement
- Stevens(1978) - continuing settlement
- F Stevens(1978) - plunging failure
- ▽ F Poulos(1981) - model tests, failure after 3-180 cycles
- F Karlsrud et al(1986) - failure after 100 cycles

図-12 Poulosによって収集された杭の繰返し載荷試験結果
(Poulos⁴⁾によるものに一部加筆)

験結果の一部(■印:Poulos⁴⁾の選択によるもの)が含まれているので、式(12)の関係がこの場合にも適用できるものとして結果の解釈を行う。

図-12の点線は、式(12)に従って求めた安定荷重領域(図-8)の境界線である。同図より、本論で提案する杭の安定条件によれば、Poulos⁴⁾の収集データの結果をうまく説明できることがわかる。

5. 降伏荷重と極限荷重の関係

これまでに述べてきたように、本論で提案する杭の安定条件(図-8)には、降伏荷重を知ることが必要である。静的載荷試験は、杭の降伏荷重を求めるための最適な手段であるが、常に実施できるとは限らない。一方、慣用の支持力計算式²⁶⁾を用いれば、地盤調査結果から粘土中の杭の極限荷重を推定することが可能である。したがって、降伏荷重と極限荷重の関係が与えられれば、本安定条件の実用性はさらに増すと考えられる。

第4章の既往の実験データは、本安定条件と以下の関係を用いることでうまく解釈することが可能であった。

$$Q_y/Q_u \approx 0.7 \quad (13)$$

そこで、式(13)の実用的な妥当性を、これまでの筆者らの実験結果と既往の文献の調査結果をもとに、以下で検討する。

表-2は、筆者ら^{1),2)}が行った静的載荷試験結果である。同表には、模型実験¹⁾(試験No.S1~S3)と現場

表—2 筆者ら^{1),2)}による静的載荷試験結果

Test No.	Load Increment	Time Interval (sec)	Load Step	Ultimate Load (Q_u)	Yield Load (Q_y)	Q_y/Q_u
(a) Model Tests ¹⁾						
S1	2.50 (kgf)	90	11	27.5 (kgf)	19.3 (kgf)	0.70
S2	2.50 (kgf)	300	10	25.0 (kgf)	19.0 (kgf)	0.76
S3	2.00 (kgf)	900	12	24.0 (kgf)	18.9 (kgf)	0.79
(b) Field Tests ²⁾						
2	1.50 (tf)	900	12	18.0 (tf)	14.4 (tf)	0.80
6	1.50 (tf)	900	12	18.0 (tf)	14.6 (tf)	0.81

表—3 Fredriksson ら²⁸⁾による静的載荷試験結果

Pile No.	Dimension	Ultimate Load Q_u (kN)	Yield Load Q_y (kN)	Q_y/Q_u
B1	18m wood + 10m concrete 0.27 * 0.27m	560	490	0.88
B2	32m concrete 0.27 * 0.27m	550	480	0.87
B3	35m concrete 0.27 * 0.27m	670	560	0.84
B4	18m wood + 10m concrete 0.27 * 0.27m	570	510	0.89
B5	32m concrete 0.27 * 0.27m	460	390	0.85
B6	35m concrete 0.27 * 0.27m	630	530	0.84
Load Increment : 1/10 of estimated failure load				Mean 0.86
Time Interval : 18 (min)				

実験²⁾ (試験 No.2 と 6) が含まれている。この模型実験は、第 2 章における繰返し載荷試験の一部と並行して行ったものである。3 つの模型実験の違いは、載荷速度 (主に荷重保持時間) が異なる点である。このため極限荷重の値はそれぞれ異なるが、降伏荷重の値はいずれもほぼ同じである。

筆者らは前報¹⁾で、粘土中の杭の基準値とすべき支持力は、載荷速度によってその大きさが変化する極限值ではなく、載荷速度の影響を受けない降伏値を用いるほうが合理的であることを述べた。繰返し荷重を受ける杭の安定条件 (図—8) を降伏荷重で表現する理由のひとつは、このことにある。なお、粘土中の杭の降伏荷重の値が載荷速度の影響を受けないことは、村山・柴田²⁷⁾によっても報告されている。

現場実験 (試験 No.2 と 6) は、同一寸法 (杭径 190.7 mm, 杭長 11.3 m) の鋼管杭に対して同じ載荷条件で行ったものである。すべての条件が同一なので、表—2 より、得られた結果はほとんど同じであることがわかる。

表—3 は、Fredriksson ら²⁸⁾の報告による軟弱な粘土中の杭の静的載荷試験結果である。試験は 3 種類の杭に対して合計 6 本行われている。載荷方法は、杭に段階的に荷重を作用させ、その荷重増分を予想される極限荷重の 10 %, 荷重保持時間を 18 分とする荷重制御方式であ

る。

以上の 3 ケースにおける Q_y/Q_u の値は、表—2~3 の右側の欄に示してある。数は少ないが、これらより、粘土中の杭の降伏荷重の値は極限荷重の値の 7 割以上で、9 割近くに達する場合もあることがわかる。

一方、杉村ら²⁹⁾と茶谷³⁰⁾は独立して、数多くの杭の引抜き載荷試験結果の解析をもとに、平均的な値として以下の関係を提示している。

$$Q_y/Q_u \approx 2/3 \cdots \cdots (14)$$

両者のデータには様々な地盤における試験結果が含まれているので、粘土中の杭に対して式 (14) が適合するとは一概に言えない。しかしながら、データ数の豊富さを考慮すると、式 (14) は意義のあるものと考えられる。

以上の結果を総合すると、繰返し荷重を受ける粘土中の杭の安定条件を考慮するに際し、式 (13) の関係を用いることは実用上妥当であると考えられる。

ただし、地盤調査結果から杭の極限荷重を推定する慣用の支持力計算式²⁶⁾は現状では精度が高いとは言えないので、杭の降伏荷重を求めるには載荷試験を行うことを原則とすることには変わりはない。

6. 結 論

本研究の結論は、以下のように要約される。

- ① 粘土中の杭の安定を確保するために、作用する繰返

し荷重に対して以下の2つの制約条件を設けることを提案する(図-8)。

$$Q_{\max} \leq Q_y \quad (15)$$

$$2 \cdot Q_{\text{amp}} \leq Q_y \quad (16)$$

ここに, $Q_{\max}$: 繰返し荷重の最大値 ($= Q_{\text{ave}} + Q_{\text{amp}}$)

Q_{ave} : 繰返し荷重の平均値

Q_{amp} : 繰返し荷重振幅

Q_y : 載荷試験から得られる杭の降伏荷重

② 上記の2つの制約条件は, 既往の実験データと比較して, 妥当であると考えられる。

③ Q_y を求めるには載荷試験を行うことを原則とするが, やむを得ない場合には, 以下の関係を用いることが可能と考えられる。

$$Q_y/Q_u \approx 0.7 \quad (17)$$

ここに, Q_u は杭の極限荷重である。

謝 辞

本論の作成にあたり, 研究成果を引用させていただいた多くの著者に心から謝意を表します。また, 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。

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) 稲 国芳, 岸田英明: 粘性土中の杭の繰返し引抜き挙動, 日本建築学会構造系論文報告集, 第438号, pp. 137~146, 1992
- 3) Karlsrud, K. et al.: Piles in Clay under Cyclic Axial loading-Field Tests and Computational Modelling, Proc., 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, pp. 165~190, 1986
- 4) Poulos, H.G.: Cyclic Stability Diagram for Axially Loaded Piles, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 877~895, 1988
- 5) Malek, A.M. et al.: Behavior of Foundation Clays Supporting Compliant Offshore Structures, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 615~636, 1989
- 6) McAnoy, R.P.L. et al.: Cyclic Tensile Testing of a Pile in Glacial Till, Proc., 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, pp. 257~292, 1982
- 7) Puech, A.A.: Basic Data for the Design of Tension Piles in Silty Soils, Proc., 3rd International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, BOSS'82, Vol. 1, pp. 141~157, 1982
- 8) Houston, W.N. and Herrmann, H.G.: Undrained Cyclic Strength of Marine Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT6, pp. 691~712, 1980
- 9) 内川祐一郎ほか2名: 単純せん断型試験機による粘土-鋼材間の摩擦, 第25回土質工学研究発表会, 2分冊の1, pp. 707~708, 1990
- 10) Broms, B. and Hansbo, S.: Soft Clay Engineering, Developments in Geotechnical Engineering 20, Edited by Brand, E.W. and Brenner, R.P., Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 417~478, 1981
- 11) Jaime, A.P. et al.: Static Tests on Friction Piles in Mexico City Clay, Proc., 12th ICSMFE, Vol. 2, pp. 1141~1146, 1989
- 12) Karlsrud, K. and Haugen, T.: Axial Static Capacity of Steel Model Piles in Overconsolidated Clay, Proc., 11th ICSMFE, Vol. 3, pp. 1401~1406, 1985
- 13) 伊藤圭典ほか3名: 送電用鉄塔基礎杭の引抜き抵抗の評価法に関する考察, 土木学会論文集, 第412号/III-12, pp. 137~142, 1989
- 14) 矢島淳二ほか2名: 鉛直・引抜き交番荷重を受ける杭の摩擦抵抗, 日本建築学会大会学術講演梗概集B構造I, pp. 1315~1316, 1989
- 15) Sugimura, Y. et al.: Cyclic Pull and Load Tests on Cast-in-place Concrete Piles, Proc. of the Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 293~296, 1991
- 16) Sangrey, D.A. et al.: The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 241~252, 1969
- 17) Lashine, A.K.F.: Deformation Characteristics of a Silty Clay under Repeated Loading, Proc., 8th ICSMFE, Vol. 1, pp. 237~244, 1973
- 18) Mitchell, R.J. and King, R.D.: Cyclic Loading of an Ottawa Area Champlain Sea Clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, pp. 52~63, 1977
- 19) Motherwell, J.T. and Wright, S.G.: Ocean Wave Load Effects on Soft Clay Behavior, Proc. of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, Vol. 2, pp. 620~635, 1978
- 20) Meimon, Y. Hicher, P.Y.: Mechanical Behaviour of Clays under Cyclic Loading, International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, pp. 77~87, 1980
- 21) Lefebvre, G. et al.: Stability threshold for Cyclic Loading of Saturated Clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, pp. 122~131, 1989
- 22) Andersen, K.H. et al.: Effect of Cyclic Loading on Clay Behaviour, Proc. of the Conference on Design and Construction of Offshore Structures, ICE, pp. 75~79, 1976
- 23) Dyvik, R. et al.: Cyclic Simple Shear Behavior of Fine Grained Soils, Proc., International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 101~106, 1981
- 24) Conn, G.M. and Hyde, A.F.L.: Critical Level of Repeated Loading for a Silty Clay, Proc. 3rd Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, Vol. 2, pp. 691~705, 1986
- 25) Hyde, A.F.L. and Conn, G.M.: Discussion on

- "Cyclic Triaxial Tests on Remoulded Clays by Procter, D.C. and Khaffaf, J.H., Vol.110, No.10, pp.1431~1445, 1984", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.113, No.6, pp.665~667, 1987
- 26) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.215~240, 1988
- 27) 村山朔郎, 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
- 28) Fredriksson, A. and Rosen, R. : Foundation on Creep Piles : Design Parameters, Graphical Presentation by Computer of Resultant Force Systems as well as an Analysis of Test Pile Results, Proc., 11th ICSMFE, Vol.3, pp.1383~1386, 1985
- 29) 杉村義広ほか6名：場所打ちコンクリート杭基礎の引抜き耐力に関する研究（その8. まとめ）—高層壁式ラーメン構造に関する研究—, 日本建築学会大会学術講演梗概集B構造I, pp.1059~1060, 1987
- 30) 茶谷文雄：杭の引抜き抵抗について, 日本建築学会大会学術講演梗概集B構造I, pp.1317~1318, 1989
- (1992年6月8日原稿受理, 1992年8月25日採用決定)
-