

(株)武智工務所 ○ 稲 国芳  
東京工業大学 藤井 啓二  
同上 岸田 英明

**概要** 一様な粘土地盤中の剛な摩擦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。すなわち、繰返しせん断を受ける粘土の挙動そのものが杭の挙動を反映していることになる。本研究は、既往の粘土の要素試験結果を援用することにより、繰返し回数をいくら増やしても決して破壊することのない杭の限界荷重の存在を示している。また模型実験により、その妥当性を確認している。

【1】はじめに

図-1は一定荷重 ( $Q_{ave}$ ) とそれに重ね合わされた繰返し荷重 ( $\pm Q_{cyc}$ ) を受ける粘土地盤中の摩擦単杭を表している。杭に作用する繰返し荷重の形態は一定荷重 ( $Q_{ave}$ ) と繰返し荷重 ( $Q_{cyc}$ ) の相対的な大きさにより、一方向載荷と二方向載荷に分類できるが、本内容は一方向の繰返し載荷 (片振り) を受ける杭について考察したものである。粘土地盤は一様であり、繰返し載荷過程では非排水状態が保たれ、また先端抵抗力は無視し得るほど小さいものとしている。さらに、本研究では杭材に起因する問題には触れない。すなわち、杭材の変形による進行性破壊の問題や、杭と土とのすべりの問題は扱わない。これらは杭を剛杭とみなし、充分な杭表面粗さにより周面抵抗力は土のせん断抵抗力として発揮されることを意味する。主題は杭であるが、主役はそれを支える土である。

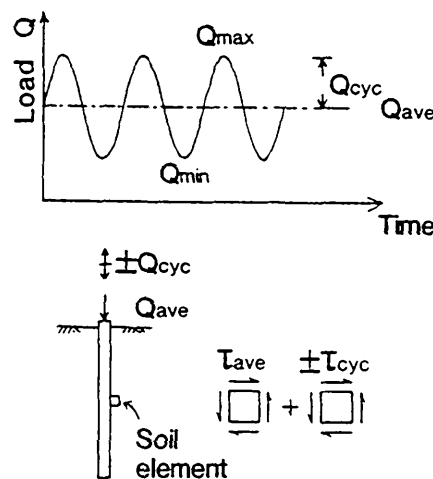


図-1 繰返し荷重を受ける粘土地盤中の摩擦杭

以上のような仮定のもとでは、一方向の繰返し非排水せん断を受ける粘土の挙動そのものが杭の挙動を反映していることになる。本研究は既往の粘土の要素試験結果を援用することにより、繰返し荷重を受ける粘土地盤中の摩擦杭の挙動を明らかにしようとしたものである。

【2】動的載荷に重要な2つの要因

地震、風や波浪力などにより杭に作用するのは、静的載荷に比して載荷速度の大きい荷重であり、またこれらは繰返し作用する。すなわち、杭を支える土は動的載荷 (石原: 1976) を受けることになる。載荷速度が土の強度、剛性に及ぼす影響については幾多の研究がおこなわれており、特に粘性土の非排水強度においてその影響が顕著であることは周知のことである。また繰返し作用する荷重の影響については、繰返し回数が増加すると共に粘性土の強度、変形特性は低下するであろうことは想像に難くない。

動的載荷とは強度、剛性の増大をもたらす大きな載荷速度の影響と、それらの低下を招く繰返しの影響という相反する2つの現象のぶつかりあいであると考えることができる。もしくは粘性土にとって有利に働く大きな載荷速度の影響で得られた強度および剛性が、繰返しの影響でどの程度までそれらが低下していくかという問題に帰せられる。

このような動的環境下における安定問題では、動的載荷に特有な因子である載荷速度の影響および繰返しの影響を中心に考察していけば、あとは静的特性の知識の助けを借りて、動的挙動を推測することが可能となる (石原: 1976)。以下、動的載荷に重要なこれら2つの要因について概観し、この2つの要因から繰返し回数をいくら増やしても決して破壊することのない粘土地盤中の摩擦杭の限界荷重の存在を示す。

Critical Load of a Friction Pile in Clay Subjected to Cyclic Axial Loads;  
Kuniyoshi Ina (TAKECHI Engineering Co., Ltd.), Keiji Fujii, Hideaki Kishida (Tokyo Institute of Technology)

### 【3】繰返しの影響

Sangrey et al. (1969)は飽和粘土について一連の一方向繰返し非排水三軸試験を行なっている。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しても破壊には至らないような応力の限界値 (Critical Level of Repeated Loading: CLRL) が存在することを示している。さらにこの限界値を越えないようなせん断応力レベルのもとでの繰返しに対して、回数を増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ような平衡状態が存在することを示している。同様の非破壊応力限界値の存在はLashine(1973), Motherwell & Wright(1978), Meimon & Hicher(1980), 網干他(1980)によっても報告されている。

一方、Hyde & Brown(1976)は粘性土の非排水クリープ特性と繰返し非排水せん断特性の類似性(ひずみと間隙水圧が前者では経過時間と共に、後者では繰返し回数と共に累積する)に着目し、破壊に至らない応力レベルのもとで、一方向繰返し非排水せん断試験における応力波形(サイン波)を一連のクリープ応力として近似する(図-2)ことにより、繰返し荷重時の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。このことは、粘性土に対する繰返し効果とは一種のクリープ現象としてとらえることができることを意味する。さらに繰返し荷重時の応力波形がクリープ応力の集合とみなされるのであれば、粘土の繰返しせん断にクリープの破壊基準(村山・柴田: 1956)が適用できることになる。すなわち、繰返し応力の最大値( $\tau_{max}$ )が粘土の上限降伏値(村山・柴田: 1956)以下であれば(図-3-a)、いくら繰返し回数が増えても粘土は破壊に至ることはなく、やがてひずみは有限値に落ち着くことになる。

一方、繰返し応力の最大値( $\tau_{max}$ )が粘土の上限降伏値を越えた場合(図-3-b)、その越えた部分のクリープ応力の集合は粘土のクリープ破壊のために費やされ、有限の繰返し回数で破壊が生じることになる。

ここでは、一方向の繰返し非排水せん断を一種の非排水クリープ、もしくは拡張された非排水クリープとみなすことにより、上限降伏値を境として粘土は異なった繰返し挙動を示すことを予測している。また前述のSangrey et al. (1969)の繰返し回数をいくら増しても破壊には至らないような応力の限界値(CLRL)は粘土の上限降伏値と推定される。村山・柴田(1956)によって提唱された上限降伏値は粘土の重要な属性であり、多くの実験的研究(Campanella & Vaid:1974, Finn & Shead:1973, Vaid & Campanella:1977)によってその存在は支持されている。

### 【4】荷重速度の影響

粘土の非排水強度の荷重速度依存性は一般に、ひずみ速度の対数に比例して強度が増加するという実験結果(例えばBjerrum(1972))で表現されるが、このひずみ速度が極めて小さくなった領域のことはよく知られていないと思われる。Vaid & Campanella(1977)は広範囲の非排水定ひずみ速度せん断試験を行ない、ひずみ速度が大きい範囲では速度の対数に対して直線的に強度が増加するが、ひずみ速度が小さい領域ではもはや強度の低下を生ずることはなく、ある一定の強度に落ち着くことを示している。さらに、このひずみ速度が小さい領域での一定強度は、同様の条件で行なわれた一連の非排水クリープ試験結果から得られた粘土の上限降伏値と一致することを報告している。

これらの結果は、粘土にとって不利に作用するゆっくりした荷重速度でせん断されても、その強度の低

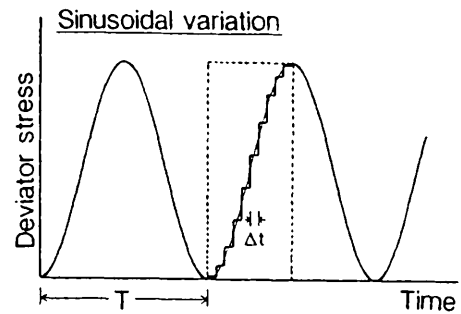
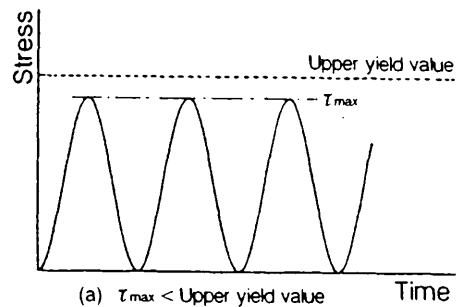
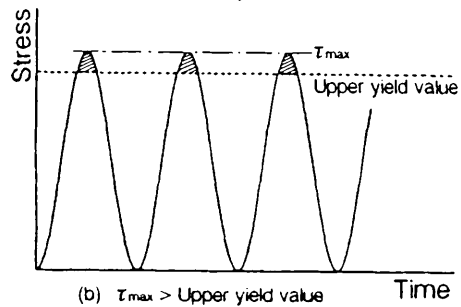


図-2 繰返しせん断応力波形の近似方法 (After Hyde & Brown: 1976)



(a)  $\tau_{max} < \text{Upper yield value}$



(b)  $\tau_{max} > \text{Upper yield value}$

図-3 繰返しせん断応力と上限降伏値の関係

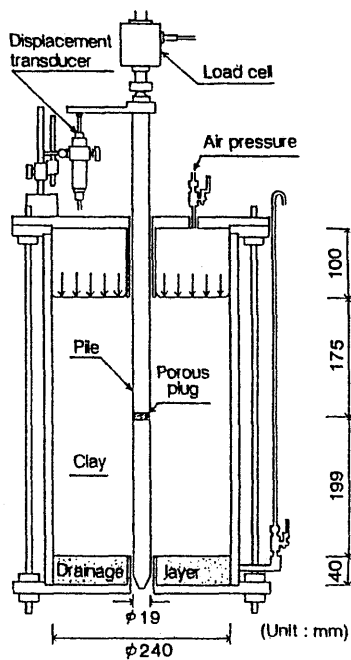


図-4 実験土槽

表-1 実験の種類および結果

実験の種類	実験内容および方法	結果
静的載荷試験(1)	上限降伏荷重 ( $Q_{uy}$ ) 設定 荷重保持時間15分, 14段階	19.3 (kgf)
静的載荷試験(2)	上限降伏荷重 ( $Q_{uy}$ ) 設定 荷重保持時間30分, 9段階	19.7 (kgf)
繰返し載荷試験	$Q_{max}/Q_{uy}=0.94$ , 2059回	非破壊
繰返し載荷試験	$Q_{max}/Q_{uy}=1.09$ , 70回	破壊

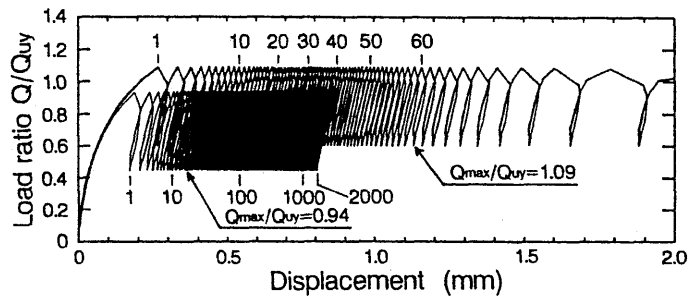


図-5 繰返し荷重比~変位曲線

下は上限降伏値までであること、すなわち上限降伏値以下の応力の作用のもとでは粘土は決して破壊することはないことを意味している。逆に言えば、上限降伏値とは載荷速度に依存しない粘土本来の強度であり、通常のせん断試験で得られる強度には、載荷速度に影響された見かけの強度が加算されていると考えることができる。

以上の考察により、一方向の繰返し非排水せん断を受ける粘土が決して破壊しない応力の限界値は、その粘土の上限降伏値であると結論できる。このことはとりもなおさず、一方向の繰返し軸方向荷重を受ける摩擦杭が決して破壊しない限界荷重として、それを支える粘土の上限降伏荷重（上限降伏値）を採用できることを意味する。なお、杭（摩擦杭）~地盤（粘土）における上限降伏荷重の求め方は、村山・柴田（1958）によってすでに与えられている。

#### 【5】模型実験による検証

（1）実験概要 実験に用いた粘土試料および実験手順は前回（稲・岸田：1988）と同様であるが、実験土槽（図-4）は一部改造され、杭先端の影響が含まれないよう工夫されている。杭はガイドを用いて真っ直ぐに貫入され、貫入に伴う過剰間隙水圧の消散を確認した後、さらに時間をおいて実験は始められた。実験の種類を表-1に示す。土槽内の粘土は実験ごとに作製された新鮮試料である。

（2）実験結果および考察 村山・柴田（1958）の方法に準じて得られた上限降伏荷重の結果を表-1に示す。載荷方法（載荷速度）の違いにもかかわらず、上限降伏荷重は一致している（村山・柴田：1958）。これは前述の上限降伏値は載荷速度に依存しない粘土本来の強度であることを裏付けるものである。

繰返し載荷試験の荷重~変位曲線を図-5に示す。荷重は上記の上限降伏荷重の平均値で正規化してあり、同図の数字はそれぞれの繰返し回数を表している。繰返し荷重の振幅および周期（ $T \approx 28$ 秒）はいずれの場合も同一である。繰返し荷重の最大値（ $Q_{max}$ ）が上限降伏荷重を越える場合、荷重~変位曲線は繰返し回数が30~40回附近まで収束の気配を示したものの、その後発散に転じ70回の繰返しで破壊している。一方、繰返し荷重の最大値（ $Q_{max}$ ）が上限降伏荷重を越えない場合、荷重~変位曲線は収束し続け、2059回の繰返し（時間にして約16時間）

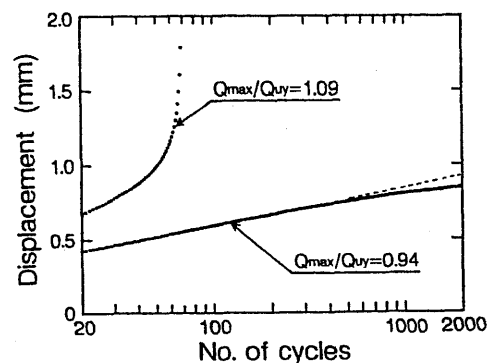


図-6 変位~繰返し回数の関係

においても破壊の兆候は見られない。繰返し荷重の最大値における変位を繰返し回数の対数に対してプロット（図-6）してみると、下に凸の形状を示す破壊の場合に比べ、2059回の繰返しで破壊しなかった場合の変位は繰返し回数の対数に対して直線的な増加を示した後、途中から上に凸の状態を示している。このことは、将来にわたって繰返し回数が増えたとしても、変位の進行はやがて停止し、もはや破壊することはあり得ないことを暗示している。

図-7は変位と経過時間の関係を示している。繰返し変位振幅は、載荷直後および破壊直前の領域を除き、両方の場合とも全載荷過程を通じ一定である。また、得られた変位～時間の関係は、粘土の非排水クリープ試験における軸ひずみと時間の関係（村山・柴田：1956, Finn & Shead:1973）に極めて類似していることがわかる。これらは、図-1において繰返し荷重振幅（ $\pm Q_{cyc}$ ）が無限に小さくなると、クリープ荷重（一定荷重）になることを考えると理解できよう。

#### 【6】実地盤における実験例

Karlsruud et al. (1986)は一樣な粘土地盤において、鋼管杭（ $\phi=153\text{mm}$ ,  $L=5.15\text{m}$ ）による一連の繰返し載荷試験を行なっている。図-8に一方方向（引抜き方向）繰返し載荷実験の結果を示す。繰返し荷重の最大値（ $Q_{max}$ ）および最小値（ $Q_{min}$ ）は極限荷重（ $Q_{us}$ ）で正規化してあり、 $Q_{min}/Q_{us} \approx 0.05$ はいずれの場合も一定である。極限荷重（ $Q_{us}$ ）は破壊に至るまで約20分を要した載荷時間で得られた値である。繰返し回数は最大12300回（時間にして約20時間）におよんでいるが、最終的には正確な測定ができないほど変位の累積の割合が小さくなったことが報告されている。

これらの結果は少なくとも、実地盤における実験においても決して破壊することのない杭の限界荷重（この実験では $Q_{max}/Q_{us} \approx 0.7$ ）が存在することを示している。

#### 【7】おわりに

本内容は繰返し軸方向荷重を受ける粘土地盤中の摩擦杭の挙動解明のための一連の研究の一部であり、特に一方方向の繰返し載荷を受ける摩擦杭の強度特性について考察したものである。既往の粘土の要素試験結果（材料強度特性）を、終始全応力的立場から解釈し、杭を支える粘土に適用する方法を用いた。

本内容の結論は言うまでもなく、一方方向の繰返し載荷を受ける杭を前提に得られたものである。二方向の繰返し（せん断方向の逆転を伴う）載荷の場合には、さらに別の配慮が必要になるとと思われる。

<参考文献> 網于他(1980), "繰返し載荷をうける飽和粘土の変形と破壊特性", 第15回土質工学研究発表会, pp. 645-648 石原(1976), "土質動力学の基礎", 鹿島出版会 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 村山・柴田(1956), "粘土のレオロジー的特性について", 土木学会論文集, 第40号, pp. 1-31 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 Bjerrum(1972), "Embankments on soft ground," Performance of Earth and Earth-supported structures, Vol. 2, pp. 1-54 Campanella & Vaid(1974), "Triaxial and plane strain creep rupture of an undisturbed clay," Can. Geotech. J., Vol. 11, No. 1, pp. 1-10 Finn & Shead(1973), "Creep and creep rupture of an undisturbed sensitive clay," 8th ICSMFE, Vol. 1, pp. 135-142 Hyde & Brown(1976), "The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading," Geotech., Vol. 26, No. 1, pp. 173-184 Karlsruud et al. (1986), "Piles in clay under cyclic axial loading (Field tests and computational modelling)," 3rd Numerical Method in Offshore Piling, pp. 165-190 Lashine(1973), "Deformation characteristics of a silty clay under repeated loading," 8th ICSMFE, Vol. 1, pp. 237-244 Meimon & Richer(1980), "Mechanical behaviour of clays under cyclic loading," Soils under Cyclic and Transient loading, pp. 77-87 Motherwell & Wright (1978), "Ocean wave load effects on soft clay behavior," Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 2, pp. 620-635 Sangrey et al. (1969), "The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading," Can. Geotech. J., Vol. 6, pp. 241-252 Vaid & Campanella(1977), "Time-dependent behavior of undisturbed clay," J., GED, Vol. 103, No. GT7, pp. 693-709

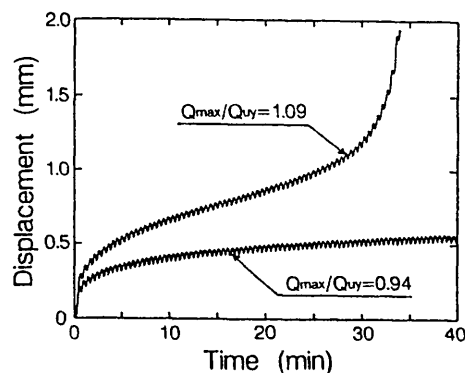


図-7 変位～経過時間の関係

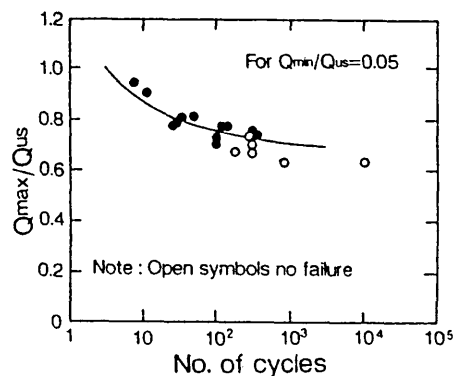


図-8 一方方向載荷の繰返し強度と回数の関係 (After Karlsruud et al. : 1986)