

波浪荷重をうける粘性土地盤の力学パラメータについて

Geotechnical Parameters Used for Design of Coastal Structures on Cohesive Seabed

安原一哉*・平尾和年**

Kazuya Yasuhara and Kazutoshi Hirao

For the prediction of the stability or settlement of the sea floor or any structure founded on it we should determine the kind of parameters to solve each problem. If we restrict our considerations to cohesive sediments, then the soil constants used for the design of coastal structures on them are classified into the two categories during and after cyclic loading, each depending on the magnitude of cyclically induced excess pore pressures and shear strains. Each category is also sub-divided into the ranges of small and large shear strains, respectively. In this paper, comments are made on both the degradation of deformation modulus during cyclic loading which is regarded as in the category of small strains and the changes in deformation and strength after cyclic loading, as pertaining to the category of large strain for cohesive soils.

KEY WORDS : Cyclic load/Cohesive seabed/Stability/Triaxial test

1. はじめに

粘土地盤上の沿岸構造物は、波浪荷重の影響をうけるのでこのことを考慮した地盤と構造物の安定と沈下の予測法を確立する必要がある。さらに、このことを可能にするためには、繰返し荷重を考慮する構成式を確立し、繰返し荷重をうける粘性土の力学的なパラメータを正確に把握しなければならない。このような観点から、本文は、繰返し荷重を受ける粘性土地盤の問題の種類と歪レベルに応じて、考えられる強度と変形に関するパラメータを整理し、これを求める試験方法とその選定方法を提案する。

2. 問題の分類

海底に堆積する粘性土はその堆積時間によって圧密状態が異なるので波浪をうけるときの問題は異なる。図-1はこれを簡単にまとめたものである。例えば、沈降中あるいは堆積中にある粘性土はいわゆる巻き上げ・沈降を繰返し、環境問題につながるシルティションや浮遊物質輸送の問題が重要である¹⁾。土の力学における一般的な表示でこれを表現すれば、このような状態にある粘性土は図-2のA点にあると考えられる。

堆積が終了し圧密中にある粘性土は未圧密状態(B点)にあるので、正規圧密土や過圧密土に比べると、強度は弱く圧縮性も大きく、したがって変形しやすい。過圧密土は応力解放によるもの(D₁点)と長期圧密によるもの(D₂点)があるが、前者は強度低下に、後者は強度増加にそれぞれつながる特徴を有する。波浪によって、非排水と排水の履歴を繰返した地盤は、後者の状態にある例が多く、また、堆積や侵食とがこれと複雑にからみ合って、しばしば陸上では経験しないような特異な挙動を示すことがあると言われている²⁾。これらは、しかし、いずれも構造物自身の自重による外力と、波の影響による外力に対する安定と沈下を予測しなければならない点で、従来の土の力学の知識では十分な解決が出来ないことがある。

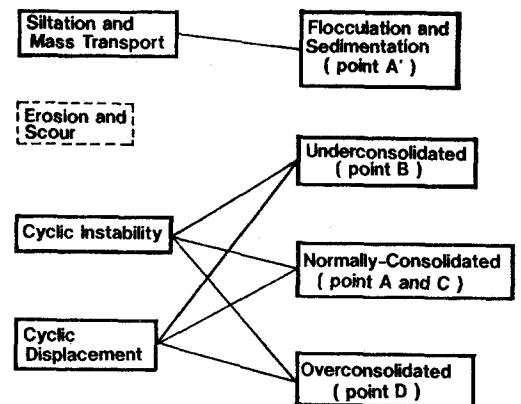


図-1 浪による海底地盤の問題の分類

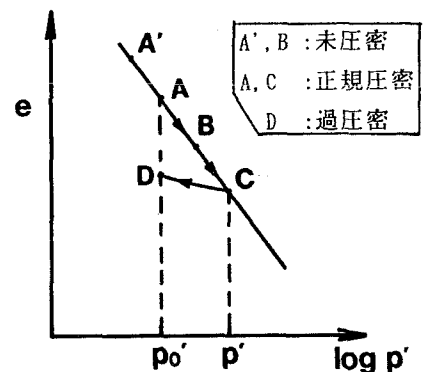


図-2 地盤内要素の間隙比圧密圧力関係

*正会員 茨城大学工学部都市システム工学科 (316 日立市中成沢町 4-12-1)

**正会員 西日本工業大学土木工学科

3. パラメータの種類と試験法

海底地盤上に築造された構造物が波浪による繰返し荷重を受けるとき、構造物下地盤の応力状態は複雑であるが、Andersen ら³⁾は、これを図-3のように単純化して表現している。このような構造物の安定と沈下の予測のような工学的の解決をに必要な海底土の力学定数は、表-1に示すように、繰返し载荷中と繰返し载荷後の2つに分けられる。そして、おのおののパラメータは、土のひずみレベルによってさらに2つのカテゴリに分けられる。

これらの力学的パラメータを求める室内試験方法は、図-4に示すようにいくつかの考えられるが、それぞれ一長一短を有する。石原⁴⁾によれば、3種類の繰返し荷重（地震、波浪、交通荷重）による地盤内応力は図-5によって特徴づけられ、波浪による繰返し荷重の応力状態を再現するためには、中空ねじり三軸試験が最適であるとされている。しかしながら、中空ねじり試験は粘性土に対しては、特に、供試体の作成や試験機の操作が難しいことなどの制約があるので、ここでは三軸試験を対象とすることにする。

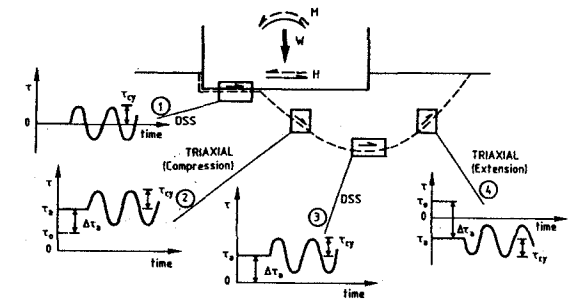


図-3 仮想すべり面に沿う土要素の応力状態³⁾

表-1 土の繰返し強度・変形に関わるパラメータ

	Small Strain	Large Strain
	Elastic	Non-elastic
During Cycling	Shear Modulus (Dynamic Modulus)	Cyclic Strength
	Damping Ratio	Cyclic Deformation Modulus (Secant Modulus)
After Cycling		Post-cyclic Strength
		Post-cyclic Recompression
		Post-cyclic Strength After Drainage
		Post-cyclic Deformation Modulus (Tangent Modulus)

Kinds of test	Stress condition	Stress path
Cyclic triaxial test		
Cyclic-simple shear test (Circular)		
Cyclic-simple shear test (Cubical)		
Torsional simple shear test		

図-4 土の室内繰返し試験

図-6は、筆者ら⁵⁾が提案する繰返し三軸試験法である。载荷方式などは、砂に対する試験法⁶⁾とほとんど同じであるが、繰返し载荷履歴後の挙動を調べる点で問題の種類が砂とは異なっているのでこのような一連の方法を提案している。前述のように、この試験機は繰返し载荷時と载荷履歴後の段階に分けられる。繰返し载荷時には、繰返し強度と繰返し変形係数が、繰返し载荷後挙動(Post-cyclic behaviour)として繰返し後静的強度と繰返し後静的変形係数を求める。繰返し载荷中に生じた過剰間隙水圧の消散を許すかどうかによってその後の挙動が代わってくる。波浪荷重をうける海底地盤においてはこのことが重要である。

4. 繰返し载荷時の力学パラメータ

4. 1 繰返し強度

砂質土に比べると粘性土の力学的性質は堆積時間の影響をうける。海底地盤の場合、それが未圧密か正規圧密あるいは過圧密（長期圧密による見かけの過圧密も含む）のどの状態にあるかによって強度は変わってくる。繰返し荷重をうけるときの抵抗力についても同様である。したがって、砂質土の繰返し強度を定義する際に用いる

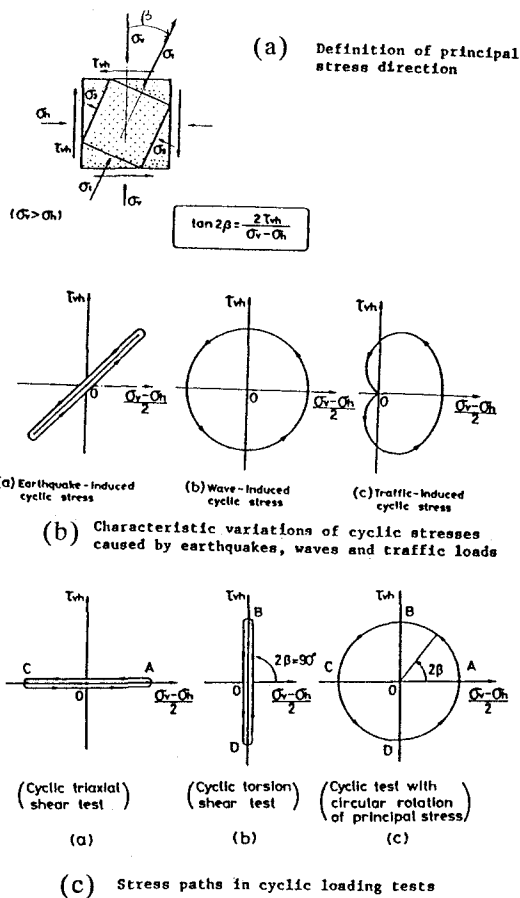


図-5 繰返し荷重を受ける地盤の応力状態と土の繰返し試験との対応⁴⁾

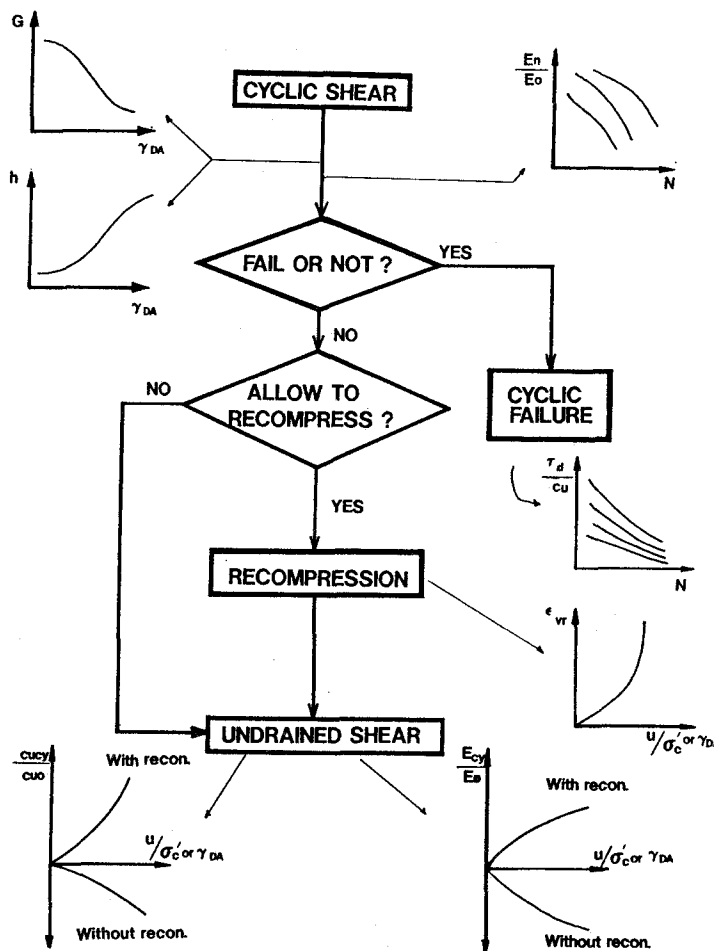


図-6 繰返し三軸試験の手順

応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c (= \tau_d/\sigma'_c)$ (σ_d : 繰返し軸差応力) と載荷回数 N 関係は、むしろせん断応力比 $\sigma_d/2s_u (\tau_d/s_u)$ (s_u : 静的非排水せん断強さ) $\sim N$ 関係で定義する方が便利である。

図-7 はこのような観点から拘束圧 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ で先行圧密時間の異なる繰返し再構成有明粘土 ($G_s = 2.57$, $I_p = 72$, $w_L = 134\%$) に対する $R \sim N$ 曲線を $\sigma_d/2\sigma_c \sim N$ および $\sigma_d/2s_u \sim N$ で整理した結果を比べたものである⁷⁾。圧密途中 (未圧密) の場合、 σ_c の代わりに σ'_c 、すなわち

$$\sigma'_c = \sigma_c \cdot U \sigma \quad (1)$$

を用いるべきである。ここで、 $U\sigma$: 有効応力に関する圧密度である。したがって、圧密途中の非排水強さ s_u は

$$s_u = m \sigma'_c = m \sigma_c \cdot U \sigma \quad (2)$$

となる。 σ_c の代わりに σ'_c を使うことと s_u を使って正規化した応力比を用いることは同義である。図-7 は従来の σ_c を用いた $R \sim N$ 曲線よりは s_u を用いた $R \sim N$ 曲線のほうが統一的に実験結果を整理できて、

$$\frac{\sigma_d}{2s_u} = a N_f^b \quad (3)$$

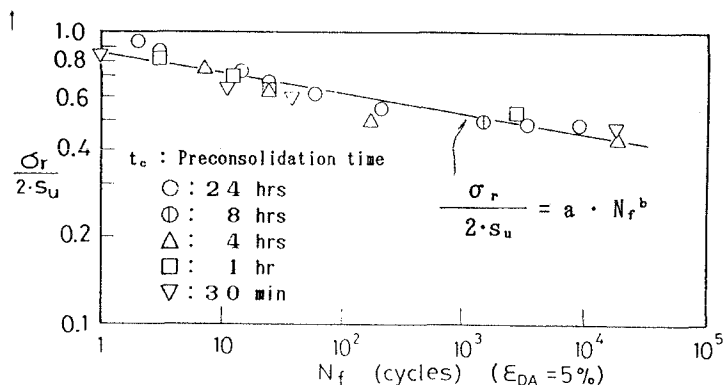


図-7 未圧密粘土の強度曲線⁷⁾

と表せることを示している。上式は間隙水圧がゼロとなった二次圧密領域においては、先に筆者らが提案した

$$s_{u0} = s_u \left(\frac{t}{t_0} \right)^R = m \sigma'_c \left(\frac{t}{t_0} \right)^R \quad (4)$$

を適用すれば式(3)は長期圧密土の繰返し強度についても有効と考えられる。ここで、 $R = Ca/C_c$ (Ca : 二次圧密係数、 C_c : 圧縮指数)である。

4. 2 繰返し変形係数

繰返し载荷をうけると正規圧密土の場合、図-8に示すように、割線変形係数土 $E_{s,1}$ は繰返し载荷にともなって低下する。すなわち、剛性は劣化する。その様子は、図-9に示すように、繰返し応力比 τ_d/s_u によって変わる。したがって、図-9を用意しておけば繰返し载荷中に生じた過剰間隙水圧あるいは、せん断ひずみによって繰返し強度を設定できれば、例えば $\tau_d/\sigma'_c = c_2$ なる繰返し荷重のもとで生じる両振幅ひずみに対応する E_{cy}/E_0 (E_{cy} : 繰返し载荷時の変形係数、 E_0 : 初期変形係数)を求めることが出来る。なお、この $E_{cy}/E_0 \sim N$ 関係は、5.2で示す繰返し後の静的変形係数に準じて予測することにする。

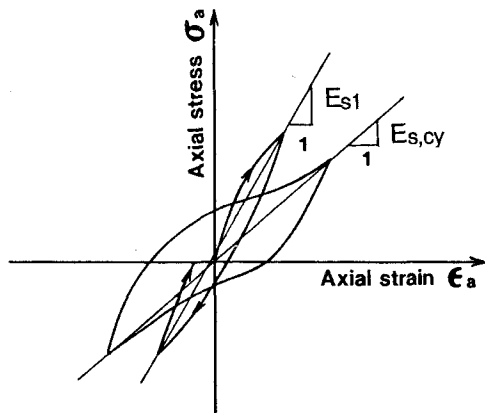


図-8 繰返し割線変形係数の定義

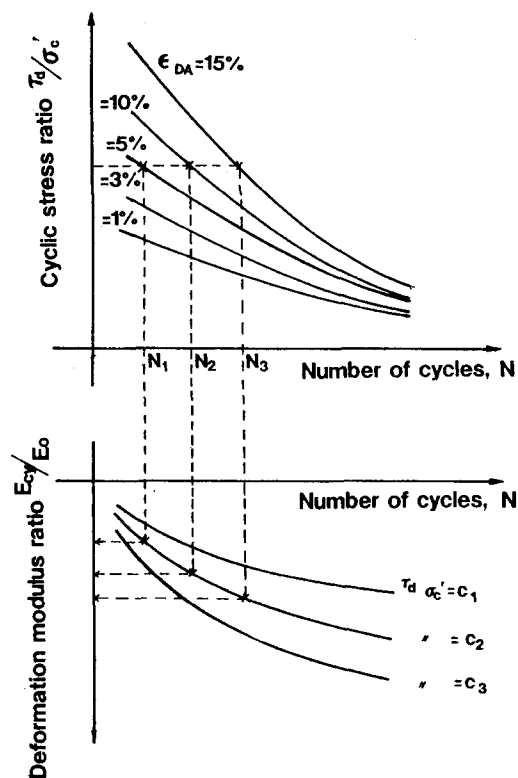


図-9 繰返し载荷中の繰返し強度と繰返し割線変形係数の関係

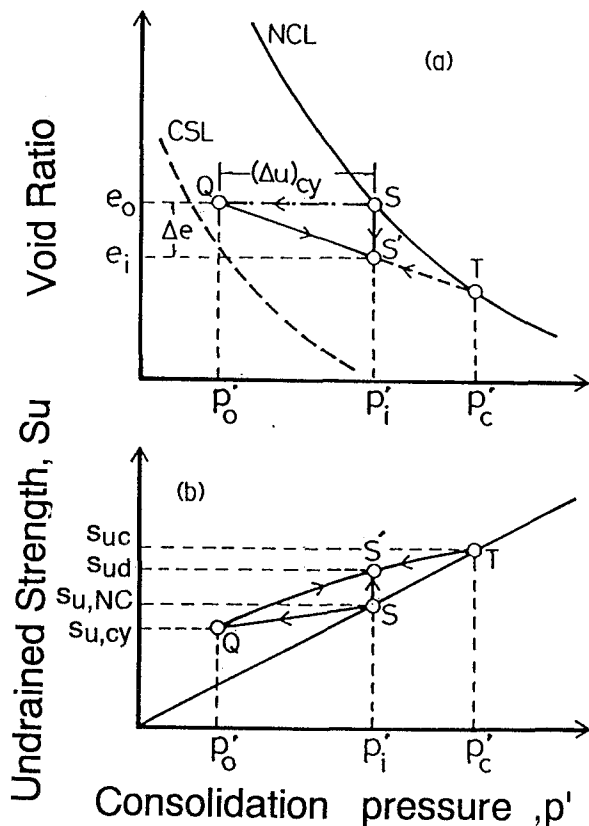


図-10 繰返し载荷履歴を受けた正規圧密土の $e - \log p' - su$ 関係

5. 繰返し载荷後力学的パラメタ

5. 1 強度変化パラメタ

繰返し载荷中の粘性土の破壊は砂質土の液状化同様のメカニズムで起きると考えられるが、透水性などの違いがあって少ない繰返し回数で特徴づけられる地震時に粘性土地盤が破壊した事例は少ない。しかし、波浪の繰返し

履歴後の非排水強度の変化の予測が必要になる。その予測式の基本は次式である⁹⁾。

$$\frac{(s_u/p)_{oc}}{(s_u/p)_{nc}} = (OCR)^{\Lambda_o} \quad (\Lambda_o: \text{実験定数}) \quad (5)$$

非排水繰返し履歴後に生じた間隙水圧を u_x とすると、強度変化は図-10を参考にすると、次式で与えられる。

$$\frac{S_{ucy}}{S_{un}} = \left[\frac{1}{1 - u_x/p'_c} \right]^{\Lambda_o/(1-\kappa/\lambda) - 1} \quad (6)$$

ここで、 s_u : 繰返し載荷後の強度、 s_{un} : 繰返し載荷前の強度、 $\lambda = 0.434 C_c$ 、 $\kappa = 0.434 C_c$ 、および Λ_o は

$$\Lambda_o = \frac{\log [(s_u/p'_c)_{oc}/(s_u/p'_c)_{nc}]}{\log OCR} \quad (7)$$

によって与えられる実験パラメタである。有明粘土に対して調べた例⁹⁾によれば、 $\Lambda_o = 0.700$ が得られているので、ここでもこれを利用することにしよう。有明粘土他いくつかの粘土に対する繰返し三軸試験における実測値と式(7)による計算値を比較した結果を図-11に示している。

5. 2 変形係数パラメタ

Houlsby と Wroth⁹⁾ の最近の研究結果にならって、過圧密土と正規圧密土の変形係数 E を拘束圧で正規化した E/p' 比は、強度変化を予測する式(5)と同様に

$$\frac{(E/p')_{oc}}{(E/p')_{nc}} = (OCR)^n \quad (8)$$

ここで、 n は、実験定数であり、Houlsby らは、土によらずほぼ一定で $n = 0.5$ としているが、この点は疑問が残る。式(5)と同様に、実験的に決めるかあるいは、 I_p などの代表的な指数的物性を媒介として決めるなどする必要がある。ともあれ、式(8)は、非排水繰返し履歴によって生じた過剰間隙水圧によって、次のように書き換えることができる。

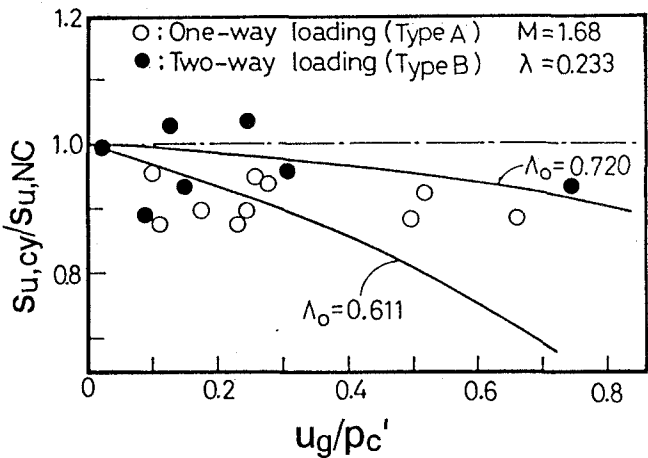
$$\frac{E_{cy}}{E_{nc}} = \left[\frac{1}{1 - u_x/p'_c} \right]^{n/(1-\kappa/\lambda) - 1} \quad (9)$$

したがって、繰返し載荷に伴う過剰間隙水圧が予測できれば、強度変化同様剛性率の変化が予測できる。

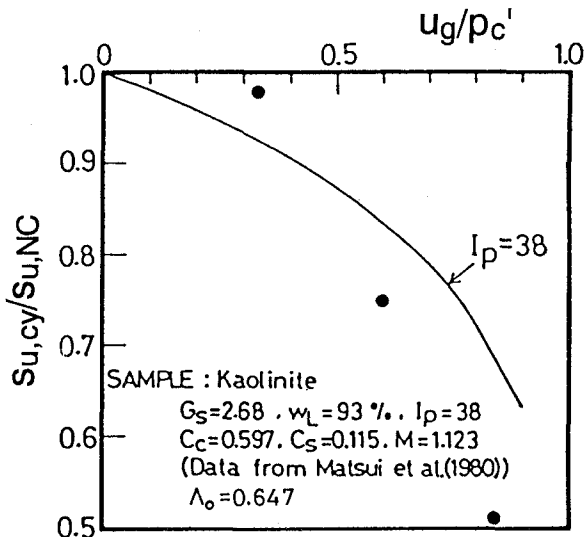
このようにして、変形係数が予測できれば、繰返し履歴後の応力・ひずみ曲線を予測することができる。

式(6)と式(8)を組みあわせると、強度変化比と変形係数の関係

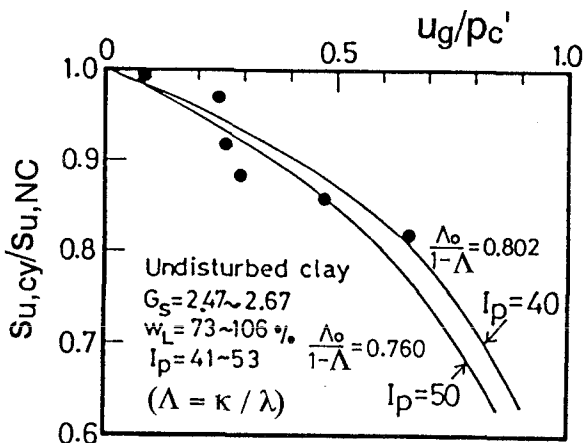
$$\frac{E_{cy}}{E_{nc}} = \left[\frac{S_{ucy}}{S_{un}} \right]^{\{n - (1-\kappa/\lambda)\} / \{\Lambda_o - (1-\kappa/\lambda)\}} \quad (10)$$



(a) 有明粘土 (著者(1992)らによる)



(b) 繰返しカオリン (松井ら(1980)による)



(c) 不攪乱粘土 (佐々木ら(1980)による)

図-11 非排水繰返し荷重履歴後の非排水せん断強度

を得る。これから、繰返し応力履歴後の強度低下比から変形係数の劣化を推定できる。いま、不攪乱有明粘土¹²⁾のパラメータとして、 $\Lambda_0 = 0.631$, $\kappa/\lambda = 0.265$, $n = 0.500$ を適用して、 $E_{t,cy}/E_{s,NC} \sim s_{u,cy}/s_{u,NC}$ 関係を求めて計算値と実測値とを比較した結果が図-11である。

5.3 剛性指数 E/s_u

式(6)式(8)によれば、繰返し載荷後の供試体の剛性指数⁹⁾ $(E_t/s_u)_{cy}$ は、

$$\frac{[E_t/s_u]_{cy}}{[E_t/s_u]_{NC}} = \left[\frac{1}{1 - u_g/p'_c} \right]^{(n - \Lambda_0)/(1 - \kappa/\lambda)} \quad (11)$$

と表わされる。

5.4 力学的パラメータに及ぼす排水履歴の影響

間隙水圧消散後の強度 $s_{u,cy}$ は図-10を参照して、式(5)を適用すれば、

$$\frac{s_{u,cy}}{s_{u,NC}} = \left[\frac{1}{1 - u_g/p'_c} \right]^{\Lambda_0 \cdot \kappa/\lambda / (1 - \kappa/\lambda)} \quad (12)$$

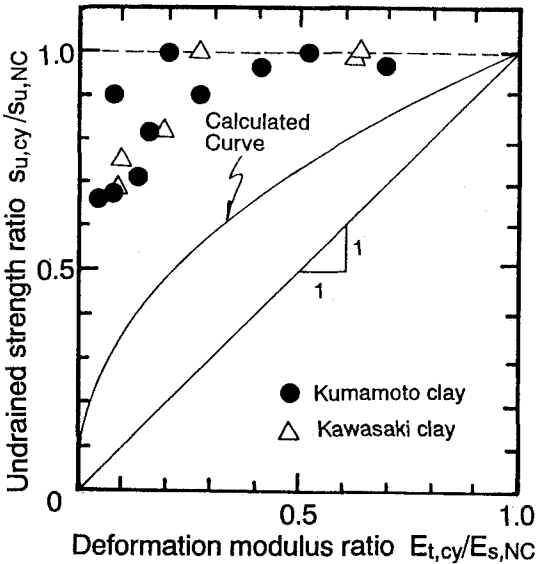


図-11 繰返し履歴後の変形係数と非排水せん断強さの関係

また、接線変形係数 $E_{t,cy}$ は、上式によって与えられる強度変化比をパラメータにして次式によって与えられる。

$$\frac{E_{t,cy}}{E_{t,NC}} = \left[\frac{s_{u,cy}}{s_{u,NC}} \right]^{(n - \Lambda_0) \cdot \kappa/\lambda / (1 - \kappa/\lambda)} \quad (13)$$

したがって、このときの剛性指数 $(E_{t,d}/s_{u,d})_{cy}$ は式(13)と同形の次式となる。

$$\frac{(E_{t,d}/s_{u,d})_{cy}}{(E_t/s_u)_{NC}} = \left[\frac{1}{1 - u_g/p'_c} \right]^{(n - \Lambda_0) \cdot \kappa/\lambda / (1 - \kappa/\lambda)} \quad (14)$$

7. あとがき

波浪荷重を受ける構造物下の粘性土地盤の挙動を予測するために必要な力学的パラメータを求めるための繰返し三軸試験法を提案し、これに基づくパラメータの決定法を示した。パラメータは、まず繰返し載荷中と繰返し載荷後に分け、繰返し載荷時のパラメータはさらにひずみレベルによって大別した。そして、これらはいずれも繰返し載荷中の過剰間隙水圧を媒介にして予測する形とした。実験結果との対応は、十分ではないので、提案法を確かめるための実験を重ね、あわせて、具体的な事例への適用性も実施したい。また、ねじり三軸試験によって得られるパラメータとの比較も今後の重要な課題である。

引用文献

1)Mimura, N. (1989) : Recent Japanese studies on cohesive sediments transport, J. of Coastal Research, Special Issue, No. 5, pp. 101-115. 2)中瀬(1988) : 海底土質、技報堂出版。 3)Andersen, K.H. et al. (1988) : Cyclic soil data for design of gravity structures, Vol. 114, No.5, pp.517-539. 4)Ishihara, K. (1983) : Soil response in cyclic loading induced by earthquakes, traffic and waves, Proc. 7th Asian Reg. Conf. SMFE, Vol. 2, pp. 42-66. 5)Yasuhara, K. et al. (1992) : Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay, Soils & Founds., Vol. 32, No. 1, pp. 100 - 116. 6)土質工学会(1990) : 土質試験の方法と解説、土質工学会。 7)Hirao, K. and K. Yasuhara (1992) : Cyclic strength of underconsolidated clay, Soils & Founds., Vol.31, No.4, pp. 180-186. 8)例えば、Mayne, P.W. (1980) : Cam-clay prediction of undrained strength Proc. ASCE, Vol.106, No.GT 11, pp.1219-1242. 9)Houlsby, G. T. and C.P. Wroth (1991) : The variation of shear modulus of a clay with pressure and overconsolidation ratio, Soils and Foundations, Vol.31, No.1, pp. 138-143. 10)Matsui, T. et al. (1980) : Cyclic stress-strain and shear strength characteristics of clay, Proc. ASCE, Vol. 106, No.GT10, pp. 1101-1120. 11)佐々木他(1980) : 粘土の動的強度、土木技術資料、Vol.22, No. 8, pp. 36-42. 12)Yamasaki, H. K. Zen (1991) : Strength reduction and deformation of clay under cyclic wave loading, Proc. Intn'l Conf. GEOCOAST'91, pp.661-665, Yokohama, Japan.