

# 繰返し载荷を受けた粘性土の 変形係数の低下とその回復

中山義久<sup>1</sup>・西田一彦<sup>2</sup>・西形達明<sup>3</sup>・井上啓司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 協同組合 関西土質研究センター 課長 (〒566-0042 大阪府摂津市東別府1丁目3-3)

<sup>2</sup>正会員 工博 関西大学 教授 工学部 土木工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町3丁目3-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 関西大学 助教授 工学部 土木工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町3丁目3-1)

<sup>4</sup>正会員 協同組合 関西土質研究センター 専務理事 (〒566-0042 大阪府摂津市東別府1丁目3-3)

鋭敏な粘性土に対して振動三軸試験機を用いて繰返し载荷履歴を与え、変形抵抗の低下を供試体内で消費されたエネルギー(累積減衰エネルギー)で整理した。変形係数の減少はそのエネルギーと一義的な関係にあることが明らかとなった。次に繰返し载荷後の強度回復過程を以下の2ケースに分けて検討した。ケースⅠ:繰返し载荷によって発生した過剰間隙水圧を再圧密により消散させる場合。ケースⅡ:繰返し载荷によって発生した過剰間隙水圧を保持し、再圧密させないで放置した場合。その結果、再圧密させない場合(ケースⅡ)の回復予測式を累積減衰エネルギーを用いて予測する方法を提案した。また再圧密(ケースⅠ)による回復メカニズムを明確にするため圧密による強度回復成分を分離し、再圧密による回復過程の定式化も試みた。

**Key Words :** clay, repeated loading, excess pore pressure, thixotropy, reconsolidation, deformation modulus, dissipated energy

## 1. はじめに

粘性土が繰返し载荷を受けると砂質土のような極端な液状化現象が生じないまでも地盤中の過剰間隙水圧が上昇し、有効応力の低下によるせん断抵抗の減少を引き起こすと考えられている。たとえば、施工現場での交通振動による矢板の傾き、または盛土による地盤沈下あるいは道路・鉄道のための低盛土による地盤沈下<sup>1),2)</sup>、交通振動に伴う地盤変形<sup>3)</sup>など被害事例がいくつか報告されている。また繰返し载荷履歴を受けて強度低下した粘性土がその後の時間経過とともに強度回復することも知られている。しかし繰返し载荷を受ける飽和粘性土の変形係数の低下と回復を詳細に検討している研究はまだ少ない。

本研究は大阪市鶴見区で採取した不攪乱粘性土の供試体に対して振動三軸試験機を用い、繰返し载荷を与えたときの変形係数の低下および繰返し载荷後の回復過程を2つの異なった条件、すなわち繰返し载荷後再圧密によって強度増加させる場合と、再圧密させない場合についてそれぞれの場合について供試体内で消費されたエネルギーとの関係で調べた。

## 2. 粘性土の動的特性に関する最近の研究

安原<sup>4)</sup>は繰返し载荷履歴後の強度回復を圧密を許す場合と許さない場合とに分け、载荷中に発生した過剰間隙水圧をもとに予測式を提案し、その適用性を検討した。その結果、ほぼ実測値に近い回復予測が可能であることを示している。しかし、塑性が高く鋭敏な粘土については過大な評価をしてしまうことが指摘されている。

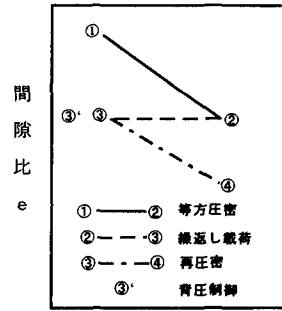
安原、永埜、半沢、湯ら<sup>5)</sup>は一面せん断試験機を用いて、繰返し载荷を受けた粘土の非排水強度の低下を発生した過剰間隙水圧の増加による有効応力の低下としてとらえ、その予測式を導き実測値と比較し、安定性評価を行っている。

正垣、三原ら<sup>6)</sup>は一軸圧縮試験機を用いて攪乱した粘土の強度回復に関して、回復過程と物性値との関係を圧密特性とシキソトロピーの両者から実験的に検討した。その結果、シキソトロピーによる強度回復は約10日から20日で終了すること、およびその回復量は全体の強度の半分程度に達することがわかった。また、圧密による強度回復にはシキソトロピー効果は顕著に表れず、圧密による構造の変化がシキソトロピーに大きく影響すると報告している。

表-1 試料の基本的性質

自然含水比 $W_n$ (%)	土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	湿潤密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	コンシステンシー特性		粒度組成(%)		
			$W_L$ (%)	$W_p$ (%)	砂	シルト	粘土
64.5	2.61	1.588	76.2	36.5	4.6	17.0	56.0
70.6	2.70	1.622	86.8	37.1	9.7	36.5	73.0

間隙比 $e_0$	一軸圧縮強度 $q_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧密降伏応力 $D_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	鋭敏比 $S_r$
1.678	0.55(53.9kPa)	0.88(86.2kPa)	20
1.761	0.65(63.7kPa)		26



有効拘束圧  $\sigma'_0$   
図-2 実験過程

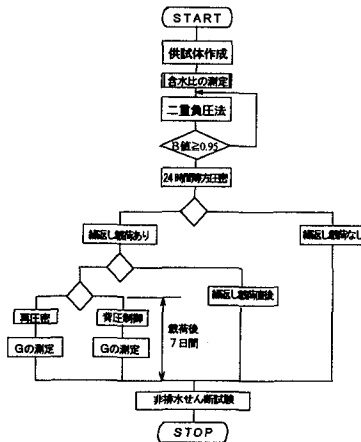


図-1 実験手順のフローチャート

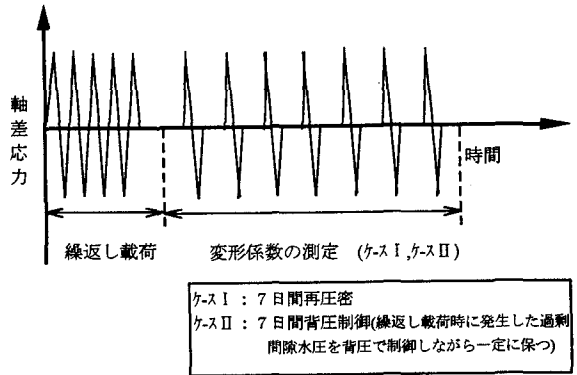


図-3 変形係数比の測定方法

浅岡, 中野ら<sup>7)</sup>は正規圧密粘土を用いて, 非排水せん断試験を行い, 破壊後のマイグレーション効果について調べた。繰返し載荷を受けた供試体は破壊後, 排水履歴により次の繰返し載荷に対してもせん断抵抗が増加する。また繰返し載荷後に非排水条件で放置した場合, 非排水にも関わらず軸差応力は時間の経過とともに緩和するという結果を得ている。

安原<sup>8)</sup>は繰返し載荷を受けた粘性土に関して, 強度よりも変形などに起因する剛性の低下が顕著であることを静的な変形係数に関する理論を用い, その予測方法を示している。また繰返し載荷を受けた粘性土は一時的な過圧密状態にあると考え, 圧密試験より得られる物性値と Wroth と Houlsby の提案式<sup>9)</sup>を利用して変形係数の低下と回復を評価する実験で求めている。

著者ら<sup>10)</sup>は不攪乱の大阪鋭敏粘土に対して繰返し載荷を行い, 供試体の動的挙動を検討した。また動的履歴がその後のせん断特性に与える影響を正規圧密領域および過圧密領域で調べた。その結果鋭敏粘土は繰返し載荷を受けて土粒子間の結合が破壊されると再圧密を行っても強度回復はかなり小さくなる

と報告している。

松井, 東, 矢野ら<sup>11)</sup>は飽和粘性土地盤の過圧密粘土に対して繰返し載荷を与えた時のせん断強度の低下を定量的に求めた。その結果, せん断強度, 破壊ひずみ, 変形係数  $E_{50}$  の低減率は平均主応力比と対数関係にある。また変形係数  $E_{50}$  は平均主応力比に対して一義的な関係にあると報告している。

平尾, 安原ら<sup>12)</sup>は未圧密で低塑性粘土の動的挙動が圧密時間に影響を受けることに着目し, 非排水繰返し載荷時の変形係数の検討を行った。その結果, 圧密度が低く, 繰返し応力比が大きい場合変形係数は小さくなる。また, 変形係数を静的な非排水強度で正規化すると, 応力比と圧密度によらない一義的な関係が認められたと報告している。

野月平, 大澤ら<sup>13), 14)</sup>は杭の打設による周辺地盤について強度変形特性の低下と回復過程の関係を予測式でそれぞれ提案している。PC 杭の打ち込みにより, 一軸圧縮強度  $q_u$  は現地盤の半分程度に, 変形係数は  $1/3 \sim 1/7$  まで低下した。数ヶ月後の強度回復過程では  $q_u$  は現地盤の  $7 \sim 8$  割程度まで回復するが, 変形係数は  $1/3$  程度までしか回復しないと報告している。

### 3. 実験に用いた試料と実験方法

本実験で用いた試料は大阪市から東大阪市に広く分布する比較的鋭敏比の大きい沖積粘性土である。土試料の採取深度はGL-10mである。その物理的性質を表-1に示す。実験手順のフローチャート、実験過程を図-1、図-2に示す。圧密圧力は $\sigma'_0 = 1.0, 2.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2 (=98, 196, 392 \text{ kPa})$ である。繰返し載荷は非排水、サイン波、周波数0.5Hzの条件で供試体に対して軸荷重とセル圧を同時に制御する二方向載荷によって与えた。供試体に与えた繰返し載荷を応力比 $r$ で表す。 $r = \tau_d / \sigma'_0$  ( $\tau_d$ :せん断応力振幅,  $\sigma'_0$ :圧密圧力)である。以下本文および図中の $r$ は応力比を示す。また間隙水圧は供試体下部で測定した。本実験では繰返し載荷による供試体の劣化を軸差応力でなく、その変形係数の変化でとらえた。変形係数は繰返し載荷中の履歴ループから算出した。剛性変化は繰返し載荷の第一波の変形係数 $G_0$ で除し、変形係数比 $G/G_0$ として整理し求めた。というのは別々の供試体の軸差応力あるいは変形係数がある基準値と比較すると供試体間の違いを避けることができないが、1本の供試体で変形係数の変化を調べることにより攪乱の程度と回復過程の連続した関係を測定できるからである。また、供試体放置条件の(再圧密させる場合および再圧密させない場合)相違による変形係数の回復を調べた。その実験過程における変形係数の測定フローを図-3に示す。

ケースI(再圧密ケース)繰返し載荷後の再圧密を行った場合の強度回復について検討するため、7日間の再圧密中の変形係数の変化を測定した。(図-2, ③→④)

ケースII(背圧制御ケース)繰返し載荷後の圧密によらないシキソトロピックな効果による強度回復を調べるため、繰返し載荷時に発生した過剰間隙水圧を背圧で制御しながら一定に保ち、7日間静置(図-2, ③→③')した。変形係数はケースI, IIともに所定の日数経過ごとに非排水状態で供試体に初期繰返し載荷時と同じ繰返し応力を2~3回与え、求めた。そしてこの時の繰返し応力は供試体内の状態変化には影響しないものと見なした。

### 4. 実験結果

#### (1) 載荷中の変形係数の検討

図-4, 5, 6は変形係数の低下を繰返し載荷中に発生する3種の影響因子(載荷回数, 過剰間隙水圧,

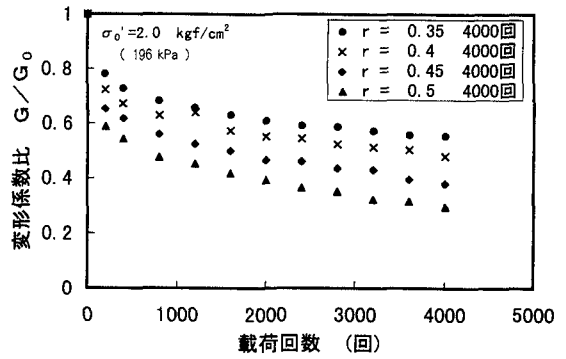


図-4 変形係数比と載荷回数の関係

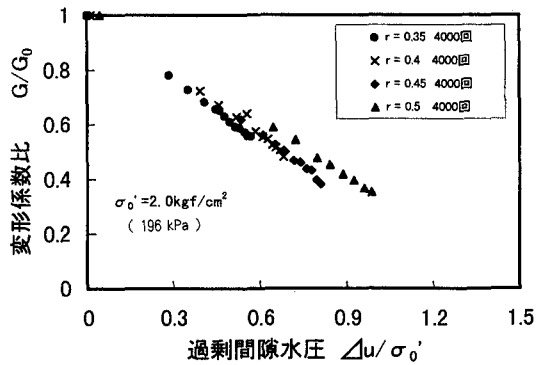


図-5 変形係数比と過剰間隙水圧の関係

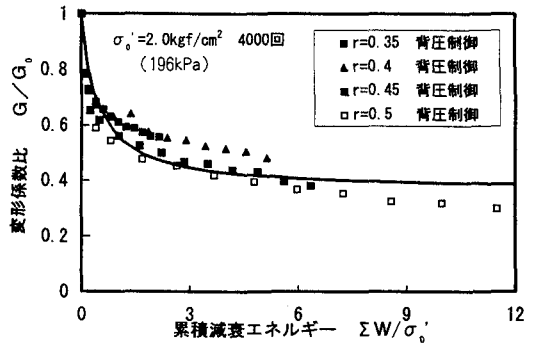


図-6 変形係数比と累積減衰エネルギーの関係

累積減衰エネルギー<sup>15)</sup>: 供試体内で消費された外的エネルギーを繰返し載荷中のヒステリシスループ内の面積とし、その面積を累積したもので $\Sigma W$ と表す)について整理したものである。図-4は有効拘束圧 $\sigma'_0 = 2.0 \text{ kgf/cm}^2 (196 \text{ kPa})$ , 載荷回数4000回の場合の載荷回数と変形係数の関係を表したものである。繰返し載荷初期に変形係数比の低下が顕著に表れる。また応力比が大きくなると変形係数比の低下量は大きくなる。

図-5は載荷中に発生した過剰間隙水圧と変形係

累積減衰エネルギー  $\Sigma W$

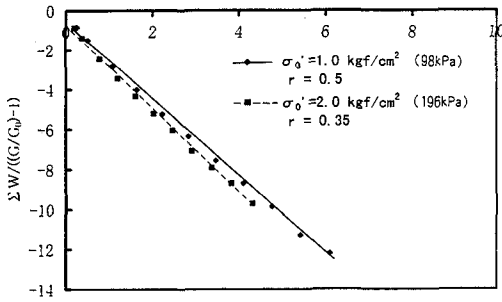


図-7 低下過程の変形係数比の双曲線近似

数の関係を有効拘束圧  $\sigma'_0 = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$  (196kPa) について応力比別にプロットしたものである。なお、過剰間隙水圧は有効拘束圧で正規化している。図から応力比の大小により、発生する過剰間隙水圧量は異なるが、発生した過剰間隙水圧と変形係数との間には一定の関係があることがわかる。

次に累積減衰エネルギーで変形係数比を表した結果が図-6 である。過剰間隙水圧の挙動と違って、曲線的な変形係数の低下を示し、累積減衰エネルギーの小さな段階で変形係数比が急激に低下する。しかし、その後の累積減衰エネルギーの増加に伴い変形係数比は緩やかな低下を呈し、収束する傾向にある。このように変形係数比と累積減衰エネルギーの間には一義的な関係があり、過剰間隙水圧と同様に数式による表示が可能である。

## (2) 累積減衰エネルギーと変形係数に関する考察

図-5, 6 では、変形特性の低下過程における変形係数比を過剰間隙水圧と累積減衰エネルギーで比較検討した。それによると剛性劣化の挙動は異なるが、一定の関係があることが認められた。

変形係数比の低下を定式化するには、過剰間隙水圧でも可能であるが、その際の測定方法には、十分信頼性における計測をしなければならない。また別の方法として供試体の剛性劣化の挙動を累積減衰エネルギーから把握する解析がある。その方法の一つに Cao ら<sup>15)</sup> は累積減衰エネルギーと剛性劣化の関係を双曲線法<sup>16)</sup> を用いて定式化している。そこで変形係数比の低下をこの累積減衰エネルギーで定式化するため、Cao らの方法に習い、式(1)のような双曲線回帰を行った。

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \frac{\Sigma W}{1.41 + 1.57 \Sigma W} \quad (1)$$

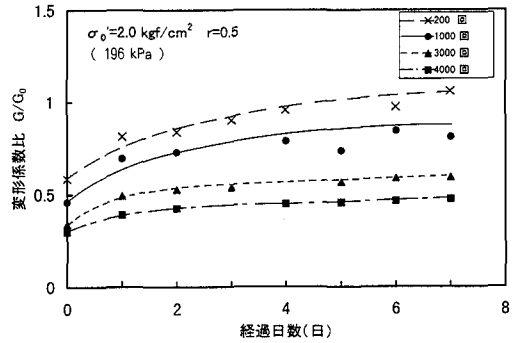


図-8 変形係数比の経時変化

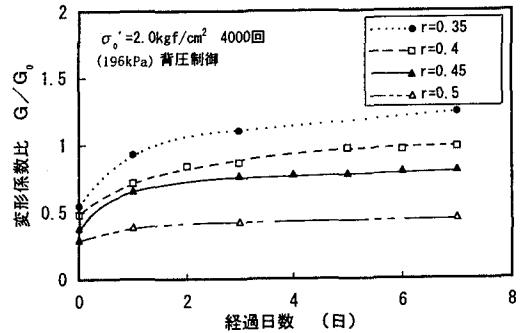


図-9 応力比別の変形係数比の経時変化

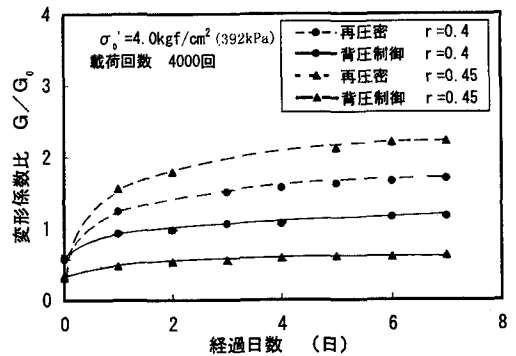


図-10 変形係数比の経時変化

$G/G_0$ ; 変形係数比,  $\Sigma W$ ; 累積減衰エネルギー

図-7 は双曲線法による結果で、各有効拘束圧別にみても、直線的な傾向にあり、その直線の切片と傾きから双曲線定数を求めた。これより変形係数比の低下量を累積減衰エネルギーから定量的に求めることができる。

## (3) 繰返し載荷後の回復における変形特性

図-8 はケース II の有効拘束圧  $\sigma'_0 = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$  (196kPa)、応力比  $r = 0.5$  について繰返し載荷後 7 日間における変形係数比の回復過程を示したものである。経過日数 0 日は繰返し載荷直後の変形係数比である。

表-2 各供試体の回復に関する定数

供試体番号	有効拘束圧 (kgf/cm <sup>2</sup> )	繰返し載荷試験条件		回復定数		
		応力比	載荷回数(回)	A	B	R <sup>2</sup>
A-1	1.0 (98kPa)	0.1	2000	1.94	1.21	0.99
A-2		0.1	4000	2.58	1.63	0.99
A-3		0.5	2000	2.00	1.56	0.98
A-4		0.5	3400	2.83	1.88	0.99
A-5		0.5	4000	2.25	1.98	0.99
A-6		0.6	900	3.76	4.91	0.99
B-1	2.0 (196kPa)	0.35	200	2.43	1.26	0.99
B-2		0.35	800	1.41	2.45	-
B-3		0.35	4000	1.50	1.24	0.99
B-4		0.4	4000	2.55	1.62	0.99
B-5		0.45	4000	1.46	2.15	0.99
B-6		0.5	200	3.76	1.75	0.92
B-7		0.5	1000	2.26	2.56	0.93
B-8		0.5	3000	3.87	3.45	0.99
B-9		0.5	4000	6.07	4.86	0.99
B-10		0.55	900	22.57	24.32	0.93
B-11		0.55	2000	8.36	7.17	0.97
B-12		0.55	3000	25.80	14.40	0.99
C-1	4.0 (392kPa)	0.3	200	2.11	1.53	0.98
C-2		0.3	4000	1.85	1.45	0.97
C-3		0.4	4000	1.88	1.43	0.99
C-4		0.45	4000	4.92	2.91	0.99

時間経過に伴い変形係数比が回復していくが、載荷回数の多いものは7日間経ても、元の変形係数比まで回復しない。載荷回数4000回の回復量は直後の変形係数比の10%程度増加する。また載荷回数の大きいものほど初期の回復速度が低く、回復に時間を要しわずかな回復しか示さない。次に図-8の有効拘束圧条件下で応力比の違いによる変形係数比の回復過程を図-9に示した。載荷回数4000回、応力比を $r=0.35\sim 0.5$ の範囲で繰返し載荷を与え、ケースIIの変形係数比の回復を経時的に測定した。応力比 $r=0.35$ 以外は載荷を与えると元の変形係数まで回復せず、応力比 $r=0.5$ ではほとんど回復しない。図-10はケースI、ケースII別の回復挙動を調べたものである。図より両ケースとも初期の回復は顕著であるが、とくに再圧密の効果(ケースI)は著しく表れている。応力比 $r=0.45$ の供試体は撓乱によるダメージが大きいため再圧密による効果が大きく発揮されている。

一方、ケースIIでは応力比が大きい程、回復量は小さい。また、両ケースともに放置3日程度でほぼ回復は終了し、その後収束する傾向にある。

#### (4) シキソトロピーによる回復過程の定式化

繰返し載荷により撓乱を受けた粘性土が時間の経過とともに回復されることは図-8, 9, 10から明確になった。繰返し載荷後、再圧密する場合、圧密とシキソトロピーの両効果が含まれていることは周知のことである。そこでこの両者の効果を分離して考えることはそれぞれの効果を見積もるのに有用である。ここでは回復挙動の解析をシキソトロピーの効果による回復、つまりケースIIによる変形係数比の回復過程の定式化を行った。

回復予測式は双曲線法を用いて回帰した。その回

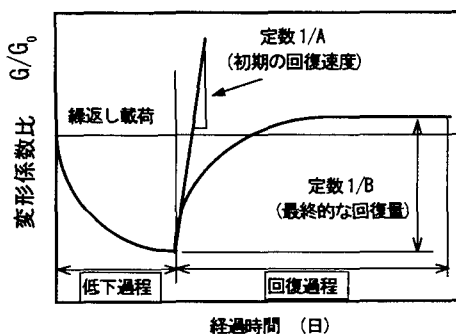


図-11 双曲線近似モデル

復予測式を式(2)に示す。定数A, 定数Bを求めるために式(2)を式(3)のように変形した。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{t}{A+Bt} + \frac{G_t}{G_0} \quad (t \geq 0) \quad (2)$$

$$\frac{t}{G/G_0} = A+Bt \quad (3)$$

ここで $G_t$ : 繰返し載荷直後( $t=0$ )の変形係数比,

$t$ : 経過時間,  $A, B$ : 実験定数である。

回復過程中的変形係数比を時間の関数とし、定数A, 定数Bで表した。表-2にそれぞれの実験供試体のA値, B値および相関係数 $R^2$ をまとめた。表よりほとんどの供試体の相関係数は0.98以上あり、回復過程の双曲線近似は有用な回帰とみなせる。

#### (5) 変形係数と累積減衰エネルギーの関係

図-11は回復過程を双曲線近似したモデルである。前節で算出されたA値, B値の逆数はそれぞれ初期の回復速度と最終的な回復量を表している。図-12

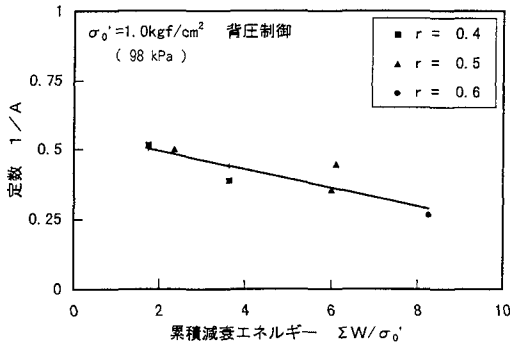


図-12 定数 1/A と累積減衰エネルギー

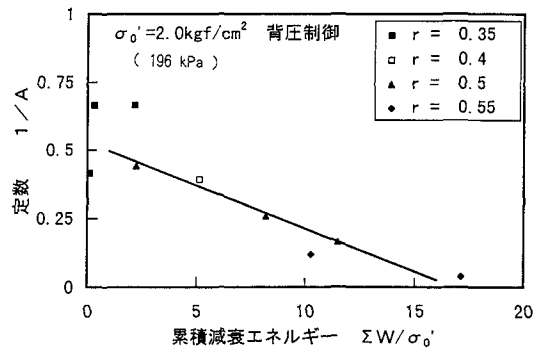


図-14 定数 1/A と累積減衰エネルギー

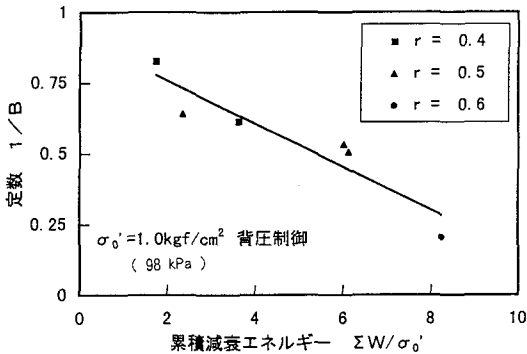


図-13 定数 1/B と累積減衰エネルギー

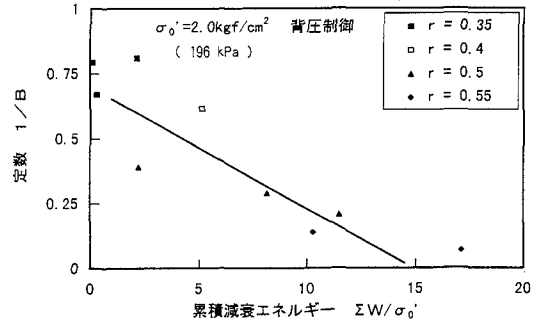


図-15 定数 1/B と累積減衰エネルギー

は  $\sigma'_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  (98kPa) の結果でそれぞれの定数を累積減衰エネルギーで表した。累積減衰エネルギーは有効拘束圧で正規化している。定数  $1/A$ 、定数  $1/B$  ともに累積減衰エネルギーの増加に伴って直線的に低下する。図-8、9 において応力比あるいは載荷回数大きいものは供試体内で消費されるエネルギー量が多いと考えられる。そのエネルギーを逸散させるための時間的遅れが回復遅延となり回復速度や最終的な回復量の低下として表れると考えられる。

次に図-14、15 は有効拘束圧  $\sigma'_0 = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$

(196kPa) での定数  $1/A$ 、定数  $1/B$  の結果で、横軸は有効拘束圧で正規化している。定数  $1/A$ 、定数  $1/B$  ともに  $\sigma'_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  (98kPa) の結果と同様の傾向を示している。

以上の結果からそれぞれの定数と累積減衰エネルギーとの間には一義的な関係があることが明らかとなった。そこでこれらの実験結果を直線回帰し、それぞれの定数を求め、回復予測式を定式化した。今回、実験を行った有効拘束圧の範囲について式(2)の定数  $1/A$ 、 $1/B$  を式(4)、式(5)に示す。

$$\frac{1}{A} = (0.59 - 0.03\sigma'_0) - (0.05 - 0.017\sigma'_0) \frac{\sum W}{\sigma'_0} \quad (4)$$

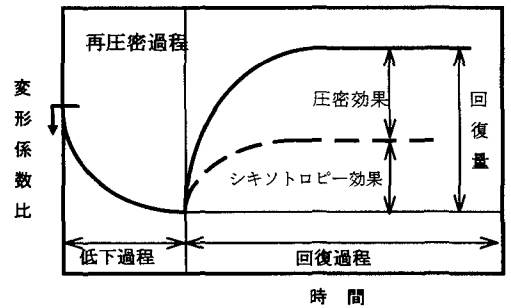


図-16 再圧密過程における回復の分担

$$\frac{1}{B} = (1.11 - 0.20\sigma'_0) - (0.13 - 0.055\sigma'_0) \frac{\sum W}{\sigma'_0} \quad (5)$$

ここで、 $\sum W$ : 累積減衰エネルギー、 $\sigma'_0$ : 有効拘束圧である。

この変形係数比の回復予測式は粘性土供試体に与えられた動的エネルギーが既知であるならば、載荷後の回復過程における変形係数を推定することができる。しかし、現段階でこの回復予測式は供試体が破壊しない領域での回復予測式であり、弾塑性的な挙動領域では有効な解析方法であると考えられる。

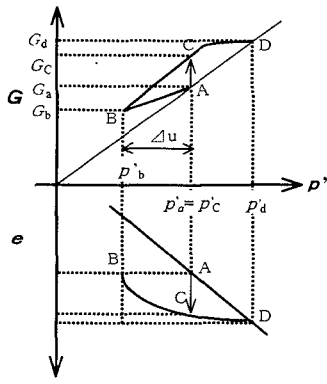


図-17 剛性率と間隙比の関係<sup>17)</sup>

### (6) 再圧密過程に対する理論的考察

再圧密の効果は図-16のように排水による圧密効果と時間の経過によって回復するシキソトロピー効果の両者の重ね合わせによって得られるものと考えた。そこで、圧密による回復に関する要因として排水量に関係する過剰間隙水圧に着目した。排水量が多いほど、密度増加の効果が大きくなり回復が急激に起こる。その後排水量の減少とともに圧密が終了し、シキソトロピーなどの硬化現象が顕著に表れる。シキソトロピー効果は前節で述べた回復予測式から求められる。圧密における変形係数の回復を Hously and Wroth<sup>9)</sup>によって導かれた応力と剛性率の関係式から推定した。図-17は正規圧密粘土と過圧密粘土の剛性率-圧密圧力-間隙比の関係を模式化<sup>17)</sup>したものである。本研究では剛性率を変形係数に読み替えて図-17に基づく考え方を適用し、安原<sup>17)</sup>の方法にならない以下のように展開する。

Hously and Wrothは過圧密領域の変形係数と正規圧密領域のそれとの比は以下のような過圧密比と一義的な関係があると報告している。

$$\frac{\left(\frac{G}{p'}\right)_B}{\left(\frac{G}{p'}\right)_D} = 1 + C \times \ln(OCR) \quad (6)$$

ここで  $G$  は各状態での変形係数、 $p'$  は各状態の有効拘束圧である。式(6)は CD 間でも同様に成立することから式(7)に変形する。

$$\frac{\left(\frac{G}{p'}\right)_C}{\left(\frac{G}{p'}\right)_D} = 1 + C \times \ln\left(\frac{p'_d}{p'_c}\right) \quad (7)$$

ここで繰返し载荷によって発生した過剰間隙水圧は有効応力の低下を引き起こし、一種の過圧密状態

であると考え、これを通常の応力解放による過圧密状態ではなく、擬似的な過圧密状態として捉えたと、図-17の AB 間がこれに相当する。そこから擬似的な過圧密比  $OCR_q$  を算出する。すなわち

$$OCR = \frac{p'_d}{p'_b}, \quad OCR_q = \frac{p'_a}{p'_b}, \quad p'_a = p'_c \quad (8)$$

繰返し载荷直後、再圧密に伴って元の有効応力状態  $p'_a$  にもどる (BC 間)。式(7)の右辺を  $p'_b$  で除すると式(9)となる。

$$\frac{G_c}{G_d} = \left(\frac{p'_c}{p'_b}\right) \times \left\{ 1 + C \times \ln\left(\frac{p'_d}{p'_c}\right) \right\} \quad (9)$$

式(9)の応力関係は式(8)の条件式から過圧密比と疑似過圧密比で表すことができ、式(10)となる。

$$\frac{G_c}{G_d} = \left(\frac{OCR_q}{OCR}\right) \times \left\{ 1 + C \times \ln\left(\frac{OCR}{OCR_q}\right) \right\} \quad (10)$$

式(10)を  $G_a$  と  $G_c$  の関係に導くため次のような操作を行う。式(8)より式(11a)が求まる。

$$\frac{OCR}{OCR_q} = \frac{p'_d}{p'_b} = \frac{p'_d}{p'_a} \quad (11a)$$

また図-17において  $p'$  と  $G$  が比例関係にあると仮定すると、次の関係が得られる。

$$\frac{G_a}{p'_a} = \frac{G_d}{p'_d} \quad (11b)$$

式(11a)と式(11b)から式(11c)が得られる。

$$\frac{OCR}{OCR_q} = \frac{G_d}{G_a} \quad (11c)$$

式(11c)の関係をを用いると式(10)は式(12)になる。

$$\frac{G_c}{G_d} = \left(\frac{G_a}{G_d}\right) \times \left\{ 1 + C \times \ln\left(\frac{p'_d}{p'_a}\right) \right\} \quad (12)$$

よって

$$\frac{G_c}{G_a} = 1 + C \times \ln\left(\frac{p'_d}{p'_a}\right) \quad (13)$$

となり、圧密圧力比で表すことができる。

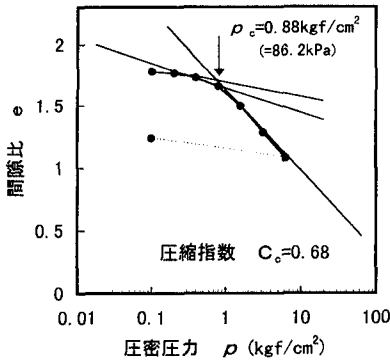


図-18 圧密試験結果

そこで、この圧密圧力を物性値変数で置き換えるため、圧力と間隙比の関係を考える。

図-18は実験で使用了試料の圧密試験結果であり、圧密降伏応力は  $p_c=0.88\text{kgf/cm}^2$  (86.2kPa) である。正規圧密領域で応力解放した場合、ある膨潤指数  $C_c$  で応力低下していく。そして再び応力を増加させると膨潤曲線を若干上回る回復ラインを通り処女圧縮曲線に接していく。この有効応力の低下を過剰間隙水圧に置き換え、擬似的な過圧密状態であると仮定してこの回復曲線を再圧密による変形係数の回復と見なした。図-18より正規圧密ラインを圧縮指数  $C_c$  で、回復ラインを再圧縮指数  $C_r$  で表しそれぞれの物理定数と発生した過剰間隙水圧から圧密圧力  $p'_d$  を算出した。圧密圧力  $p'_d$  は式(14)のように表すことができる。

$$p'_d = p'_a - \frac{C_r}{C_r - C_c} \times \Delta u \quad (14)$$

式(14)を式(13)に代入すると圧密を行った場合の変形係数比の回復式は次式(15)で表すことができる。

$$\frac{G_c}{G_a} = 1 + C \times \ln \left( \frac{p'_a - \frac{C_r}{C_r - C_c} \times \Delta u}{p'_d} \right) \quad (15)$$

ただし、この関係式は繰返し載荷直後の圧密が100%終了した時点の状態を表現するものであり、圧密が進行中の変形係数比を求めるにはより詳細な検討が必要である。

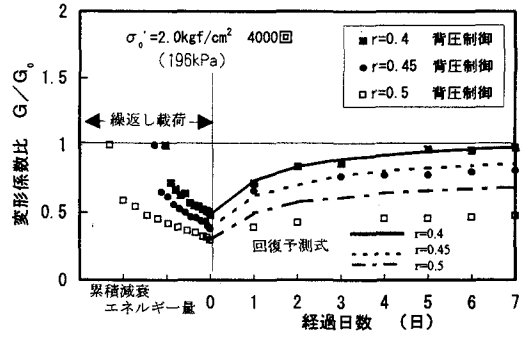


図-19 回復予測値の適用性の検討

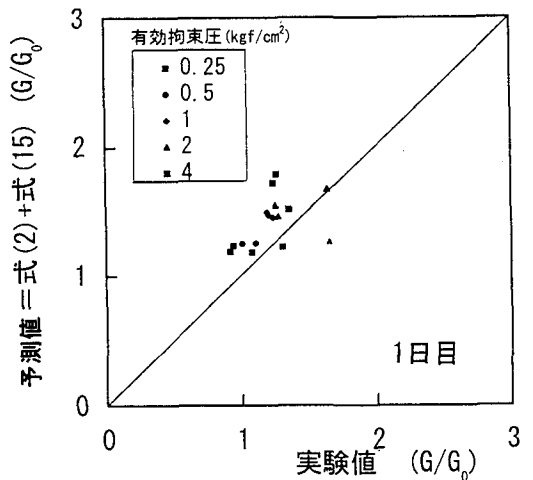


図-20 再圧密による回復予測 (1日目)

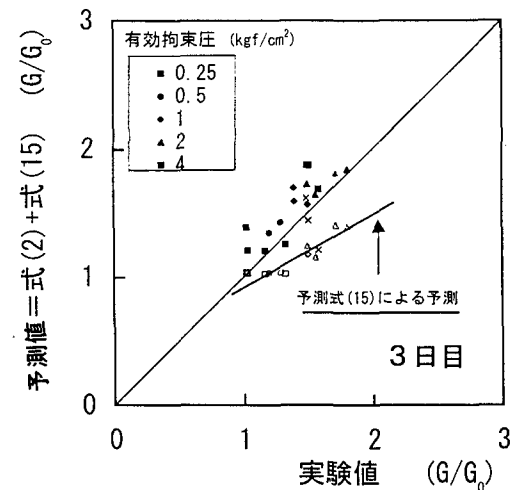


図-21 再圧密による回復予測 (3日目)



## (7) 変形特性における低下・回復過程の理論的解析

ここでは実験により得られたそれぞれの関係式を用いて実際の実験値との比較検討を行う。変形係数の低下過程と累積減衰エネルギーとの関係は式(1)に示す通りである。

ケースⅡの回復過程はシキソトロピーによる硬化現象によるもので繰返し载荷によって与えられた累積減衰エネルギーと一義的な関係にある。そして式(2), (4), (5)を用いて回復予測値を求めた。図-19はケースⅡの有効拘束圧 $\sigma_0=2.0\text{kgf/cm}^2(196\text{kPa})$ , 载荷回数4000回の結果である。回復した変形係数の実測値と回復予測値を併記した。背圧制御による回復は繰返しせん断応力の小さいものほど回復予測値と一致しており、ある程度回復予測が可能である。しかし繰返しせん断応力比が大きくなると回復予測値と実験値の差は大きくなり、特に最終的な回復量を過大に評価する。この原因として回復予測式は初期の回復速度や最終的な回復量に依存するパラメータから決定されており、弾塑性的な挙動を示す領域では、提案した回復予測式の適用性が認められた。しかし破壊しないまでもかなりの強度の低下が生じた場合、有効な回復予測が困難になる。このような破壊状態または破壊に至る直前の塑性的な挙動を把握するには土構造の微視的な影響を考慮する必要がある。

次に再圧密による回復機構について理論的な考察と適用性について検討する。図-20, 21は縦軸に前節の再圧密による回復予測値と背圧制御による回復式を用いて算出された予測値を、横軸には再圧密によって回復された変形係数の実験値を表し、比較検討したものである。すべての有効拘束圧の結果をプロットしてある。図-20は回復過程1日目の結果で、45°ラインにおおよそ近い結果となったが、全体に上部にシフトした形になり、再圧密による回復量が過大に評価されている。再圧密による回復予測式(15)では一次圧密が100%完了した場合を想定しており、回復過程1日目では実際の供試体の圧密が途中段階であるためこのような結果になったと考えられる。そこで圧密がほぼ終了していると思われる3日目の結果を図-21に整理した。なお、再圧密による回復予測式(15)による計算値を白抜きのプロットで併記してある。全体に変形係数が回復されているため、右上がりに広がりつつある。図-20と比較してほぼ実験値と良い対応関係にあり、再圧密による回復予測式(15)の妥当性が伺われる。また図-21より

再圧密の回復過程にはシキソトロピーによる回復効果が全回復量の30~40%を占めており、時間などによって回復されるシキソトロピー効果も回復過程において無視できない要素である。

## 5. 結論

本研究では不攪乱粘性土に対して繰返し载荷中の剛性低下と载荷後の剛性回復の挙動を把握するため、载荷中の変形係数の低下、および载荷後の回復過程の両面にわたって検討を行った。変形特性の低下過程において供試体に与えた累積減衰エネルギーによる解析を行った。さらに、その後の回復過程において変形係数を経時的に測定し、累積減衰エネルギーを用いた回復予測式の定式化を試みその妥当性について考察した。研究成果を以下にまとめる。

- 1) 低下過程における変形特性を定量的に表現するため供試体で消費された累積減衰エネルギーと繰返し载荷によって発生した過剰間隙水圧の両者から比較検討した。その結果、累積減衰エネルギーおよび過剰間隙水圧のそれぞれと変形係数比とは一義的な関係が存在した。
- 2) 回復過程において背圧制御による変形係数比の回復予測式を定式化した。回復予測式には双曲線を用い、その妥当性についても検討した。その結果、双曲線法により経時変化による変形係数比の回復は双曲線的な回復を示すことがわかった。
- 3) 変形係数比の回復に及ぼす影響因子について検討したところ、回復過程の初期の立ち上がり、つまり回復速度や最終回復量は繰返し载荷によって供試体内で消費された累積減衰エネルギーと比例的な直線関係にあることがわかった。
- 4) 再圧密による変形係数の回復予測式と背圧制御によるそれから再圧密時の一次圧密のみによる回復とシキソトロピー効果による回復を分離して考慮することができた。

## 参考文献

- 1) 安原一哉, 平尾和年: 三軸繰返し圧縮試験による低盛土道路の評価第17回土質工学研究発表講演集, pp. 2025~2028, 1982.
- 2) 兵動正幸, 安原一哉, 伊東尚美, 小林孝洋: 交通荷重を受ける低盛土道路・基礎地盤中の応力評価のための現地試験と解析, 土と基礎, Vol. 37, No. 8, pp. 33~38, 1989.
- 3) 都淳一, 松波哲夫, 佐藤裕: 博見線路盤調査報告(第一報), 国鉄内部資料

- 4) 安原一哉：繰返し荷重を受ける粘性土の強度劣化と回復の予測，第 28 回土質工学研究発表会講演集，pp. 699～702, 1993.
- 5) 安原一哉，永埜宗孝，半沢秀郎：直接せん断試験による繰返し履歴を受けた粘性土のせん断強度の劣化，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp. 885～886, 1994.
- 6) 正垣孝晴，茂龍勇人，木暮敬二，須藤剛史：非排水強度異方性に及ぼす攪乱の影響，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp. 537～538, 1994.
- 7) 浅岡顕，中野正樹：練り返し正規圧密粘性土の非排水せん断強度の回復に関する三軸圧縮試験，第 27 回土質工学研究発表会講演集，pp. 649～650, 1992.
- 8) 安原一哉：繰返し荷重による粘土の剛性劣化とその予測，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp. 881～882, 1995.
- 9) Houlby, G. and C. P. Wroth: The Variation of Shear Modulus of a Clay with Pressure and Overconsolidation Ratio, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 3, pp. 138～143, 1991.
- 10) 西田一彦，井上啓司，中山義久：繰返し载荷を受ける粘土のせん断挙動，土木学会論文集，No. 481, pp. 1～10, 1993.
- 11) 松井保，東和博，矢野勝史：繰返し载荷を受ける過圧密粘土の劣化特性に関する研究，第 49 回土木学会年次学術講演会集，Ⅲ-248, pp. 486～487, 1994.
- 12) 平尾和年，安原一哉：未圧密粘性土の繰返し変形係数，第 28 回土質工学研究発表会講演集，pp. 1055～1056, 1993.
- 13) 小松田精吉，野月平義則：鋭敏性粘土から軟岩までの  $E_{50}$  相関性について，第 22 回土質工学研究発表会講演集，pp. 495～496, 1987.
- 14) 野月平義則，大澤冬樹：粘性土地盤の攪乱による強度低下の事例，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp. 655～666, 1994.
- 15) Cao, Y. L. and Law, K. T.: Energy Dissipation and Dynamic Behaviour of Clay under Cyclic Loading, *Canadian Geotech. Jour.*, Vol. 29, pp. 103～111, 1992.
- 16) 西田一彦，福田護，竹下貞雄，山本和夫，澤孝平，佐々木清一：土質工学—土木教程，鹿島出版会，pp. 92～93, 1992.
- 17) 安原一哉：粘性土のせん断剛性率に及ぼす二次圧密の影響評価，第 49 回土木学会年次学術講演会集，Ⅲ-259, pp. 508～509, 1994.

(1997. 2. 13 受付)

## DECREASE AND RECOVERY IN DEFORMATION MODULUS OF CLAY SUBJECTED TO REPEATED LOADING

Yoshihisa NAKAYAMA, Kazuhiko NISHIDA, Tatsuaki NISHIGATA  
and Keiji INOUE

This paper describes the results of the experimental studies on deformation modulus of the clay which is related to energy dissipated in specimen during application of repeated loading. The specimens after application of repeated loading were cured in two different ways; the one is under undrained state, the other is under drained state in order to find the difference in recovery phenomenon between with and without reconsolidation.

As a result, it was made clear that recovery in deformation modulus due to reconsolidation can be separated from that due to thixotropy.