

# 粘性土の動剛性率と減衰定数の挙動について (その2)

——主に過圧密比の影響について——

齋藤二郎 平間邦興  
鳥井原 誠

## Behaviors of Shear Modulus and Damping Ratio in Clay Soils (Part 2)

——Influence of Over-consolidation Ratio——

Jiro Saito Kunioki Hirama  
Makoto Toriihara

### Abstract

Today, it is said that one of the most important dynamic soil properties is the dynamic shear modulus ( $G$ ), while another is the damping ratio ( $h$ ). These two values are complicatedly influenced by strain ( $\gamma$ ), confining pressure ( $\sigma_0$ ), void ratio ( $e$ ), over-consolidation ratio (OCR), number of cycles of loading ( $N$ ), etc. In this report, the influence of over-consolidation ratio is mainly investigated. As a consequence of this study, it is obtained that the value of  $G$  varies with overconsolidation ratio at strain smaller than  $5 \times 10^{-3}$ .

Further, a comparison of test results is made with the Ramberg-Osgood model that is one of the stress-strain relationships of soil. Still further, as a result of dynamic failure tests of saturated clays, it is confirmed that the dynamic failure criterion of saturated clays is similar to the liquefaction of saturated sands.

### 概 要

現在、土の動的性質の中で大きく取り上げられているものは、変形特性を表わす指標としての動剛性率( $G$ )と減衰定数( $h$ )である。これら二つの特性値は、ひずみ( $\gamma$ )、拘束圧( $\sigma_0$ )、間げき比( $e$ )、過圧密比(OCR)、繰り返し载荷回数( $N$ )など、数多くの因子により複雑な影響を受けるが、この報告では、特に過圧密比に注目して検討を加えた。その結果、ひずみが $5 \times 10^{-3}$ 以下では、 $G$ の値が過圧密比によって大きく異なることが明らかになった。

また、得られた試験結果を土の動力学モデルの一つである Ramberg-Osgood モデルに当てはめ、実測値と計算結果の比較検討をおこなった。

さらに、飽和粘性土の動的破壊試験をおこない、その動的破壊基準が砂質土の液状化破壊基準と同様の手法で整理できることが明らかになった。

### 1. まえがき

現在、土の動的特性値の中で大きく取り上げられているものは、変形特性を表わす指標としての動剛性率( $G$ )と減衰定数( $h$ )である。これら二つの特性値は、ひずみ( $\gamma$ )、拘束圧( $\sigma_0$ )、間げき比( $e$ )、過圧密比(OCR)、繰り返し载荷回数( $N$ )など数多くの因子により複雑な影響を受けるが<sup>1)</sup>、このうち特に過圧密比に関する検討をおこ

なったので、その概要をここに報告する。

また、土の動的破壊については、砂質土の場合には液状化現象として種々の研究がなされているが、粘性土については、いまだ不明な点が多い。そこで、この報告では、過圧密比の異なる試料について種々の応力比( $\sigma_d/2\sigma_0$ )の下で長時間一定振幅载荷試験を実施し、飽和粘性土の動的破壊現象についても若干の考察を試みた。

## 2. 試料

使用した試料は千葉県佐倉市臼井で採取した軟弱な沖積粘性土を乱したものであり、これを軸圧  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  で長時間再圧密して供試体を作成した。物理的性質を表一に示す。

粒度組成 (%)			比重	コンシステンシー特性		
砂	シルト	粘土		LL	PL	PI
17.0	26.4	56.6	2.65	66.7	47.9	18.7

表一 試料の物理的性質

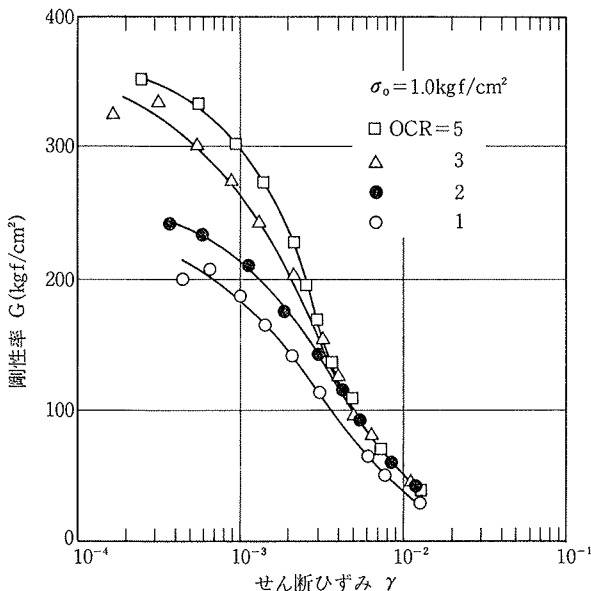
## 3. 実験方法

実験はすべて、動的三軸試験機を使用したCU条件の応力制御法である。実験手法としては、繰り返しせん断応力の振幅は段階的に増加させる段階載荷試験と一定振幅応力を長時間加える一定振幅試験の2種である。振動波形は正弦波、振動数は  $1 \text{ Hz}$  であり、段階載荷試験における一段階の載荷回数は30波である。試験体の形状寸法は  $50 \phi \times 125 \text{ mm}$ 、拘束圧は等方圧で  $1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、過圧密比は 1, 2, 3, 5 の4種である。

G, h の算出には上記試験より得られる応力-ひずみ履歴曲線を用いた。

## 4. 結果と考察

図一は段階載荷試験の結果からGとせん断ひずみ $\gamma$ の関係を片対数紙上で示したものである。ここで、過圧密比OCRは1, 2, 3, 5の4種である。ひずみが小さい



図一 Gと $\gamma$ の関係

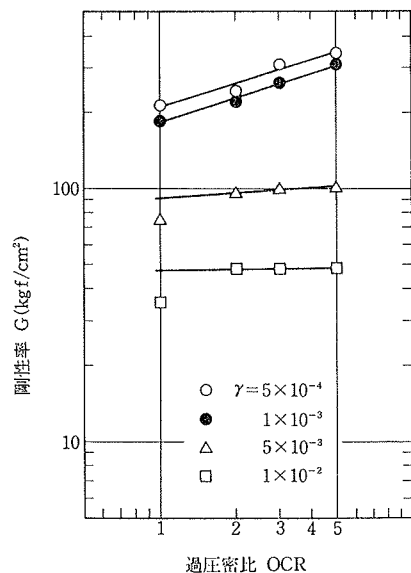
うちは過圧密比が大きくなるほどGも大きな値を示すが、 $\gamma=5 \times 10^{-3}$ 程度以上になると過圧密比の影響は、小さくなるようである。一般に、過圧密を受けた土は強度が増すことが知られている。そのため、今回の試験結果においても過圧密比が大きくなるほど、Gが大きくなっているのである。一方、土はひずみが大きくなるとダイレタンシー特性が表面化してくるため、その変形挙動は塑性的色採を増してくるともいわれている<sup>2)</sup>。その結果としてひずみが $\gamma=5 \times 10^{-3}$ 程度以上になると、その土が過去に受けた過圧密応力履歴の記憶を失い、いずれの過圧密比においてもG $\sim$  $\gamma$ 曲線が一致してきたものと考えられる。

図二は図一の結果からひずみをパラメータとしてGと過圧密比の関係を両対数紙上で示したものである。それぞれのひずみで両者の間に直線関係が認められ、その勾配はひずみが大きくなるほど減少している。

図三は同じく段階載荷試験の結果からhとひずみの関係を片対数紙上で示したものである。Gの場合と同様に過圧密比は1, 2, 3, 5の4種である。ひずみが大きくなるほどhの大きくなる傾向は明らかであるが、過圧密比の影響については明確でない。

図四、8はそれぞれ過圧密比が1および3の供試体について、種々の応力比で長時間一定振幅試験を実施し、繰り返し載荷回数Nの増加とともにGの低下している様子を示したものである。これらの図では載荷初期のGの値が一致しないため、G $\sim$ N関係に及ぼす応力比の影響が分かりにくいきらいがある。そこで、各繰り返し載荷回数でのGを初期のG(以下G<sub>p</sub>とする)で規準化しG/G<sub>p</sub>で示したのが図五、9である。

これらの図から、応力比が大きくなるほどG/G<sub>p</sub>は繰



図二 GとOCRの関係

り返し载荷回数増加にともなって急激に減少し、ついには破壊に至る状況が明らかである。また、過圧密比が大きいほど破壊に至らしめる応力比は大きくなるようである。

図-6, 10は同じ試験から得られた $h$ と繰り返し载荷回数との関係である。応力比が大きくなるほど、繰り返し载荷回数増加とともに $h$ が急激に大きくなる状況が明らかである。また、過圧密比が大きくなると $h$ は相対的に小さくなり、しかも、その増加傾向もかなり遅れてくるようである。

図-7, 11はひずみと繰り返し载荷回数との関係である。応力比が大きくなるほど、繰り返し载荷回数増加とともにひずみは急激に大きくなる。小川等<sup>3)</sup>はひずみが急増する点に注目し、この状態で土は降伏したものと考へて、この繰り返し载荷回数を降伏载荷回数( $N_Y$ )と名付けたが、今回の試験結果からもこの降伏载荷回数を求めることができる。具体的には図中に破線で示されるように、近似的に $\gamma=5 \times 10^{-3}$ の点でひずみが急増すると考へてよさそうである。ここで、このひずみレベルが図-1で示した過圧密比の影響が消失する点と一致することは非常に興味深い傾向といえる。すなわち、この点が土の変形特性のうち塑性的性質が卓越し始めるひずみレベルだと考へられるのである。

以上のことから、飽和粘性土の動的強度に関する若干の考へを加えてみる。砂質土の動的強度については液状化現象として種々の研究がなされてきたが、飽和粘性土についても同様に、ある大きさの応力を繰り返し受けて、せん断抵抗力が徐々に低下し、飽和砂の液状化に似た傾向を示すが、図-4~11より明らかである。したがって、液状化の発生基準の表示法にならって、縦軸

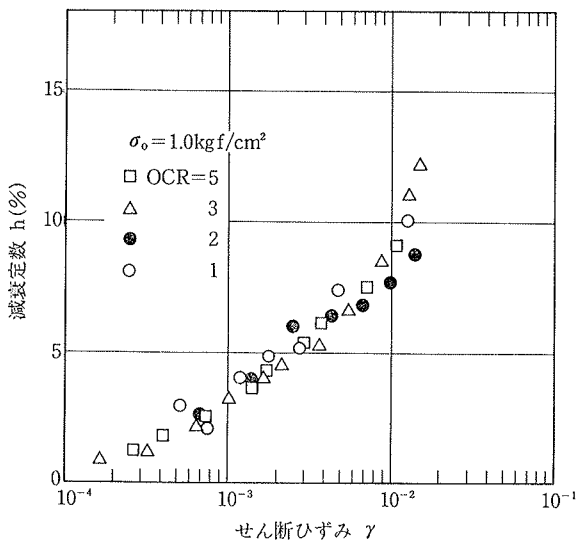


図-3  $h$  と  $\gamma$  の関係

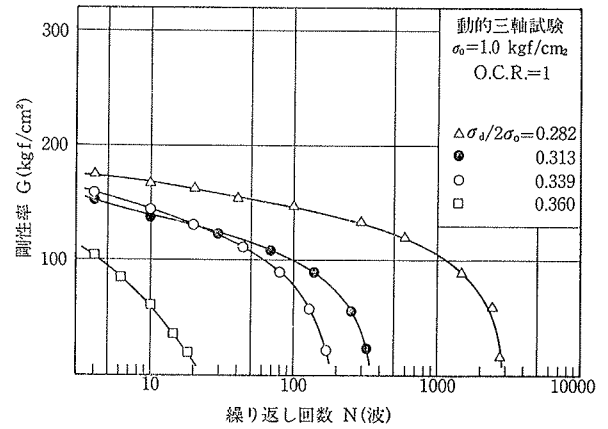


図-4  $G$  と  $N$  の関係 (OCR=1)

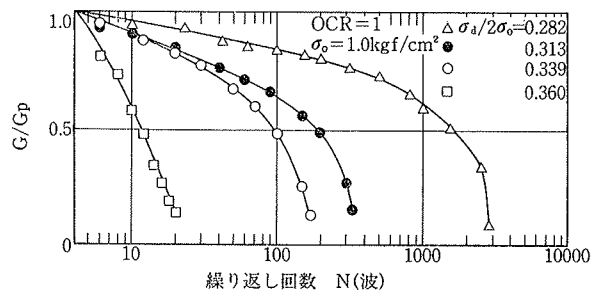


図-5  $G/G_p$  と  $N$  の関係 (OCR=1)

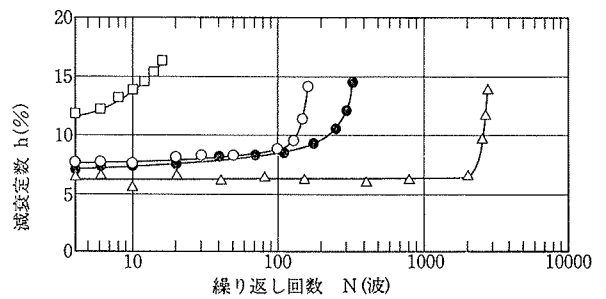


図-6  $h$  と  $N$  の関係 (OCR=1)

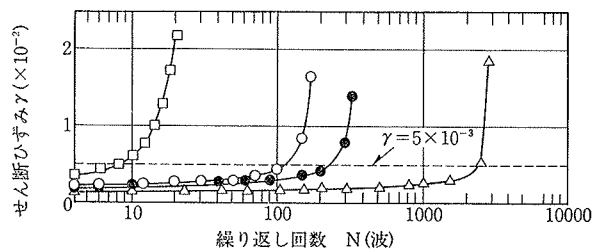


図-7  $\gamma$  と  $N$  の関係 (OCR=1)

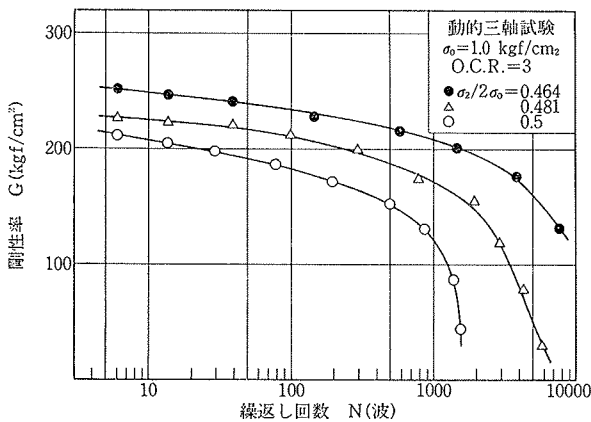


図-8 G と N の関係 (OCR=3)

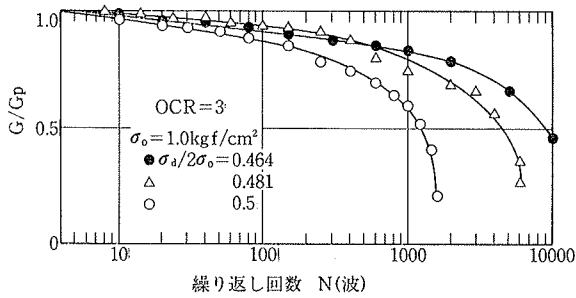


図-9 G/G<sub>P</sub> と N の関係 (OCR=3)

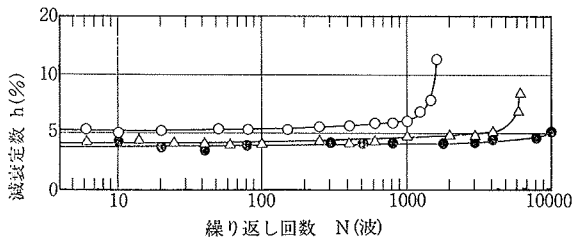


図-10 h と N の関係 (OCR=3)

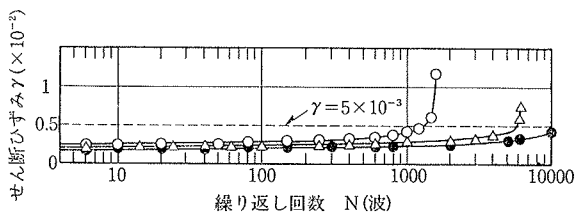


図-11 γ と N の関係 (OCR=3)

に応力比を、横軸に降伏载荷回数をとると、繰り返し応力を受ける飽和粘性土の降伏基準が得られる。それを示したのが、図-12である。この図には OCR=1, 3, 5 の場合を示しているが、いずれも応力比が大きくなるほど、降伏载荷回数の小さくなる傾向が明らかである。また、過圧密比が大きくなると、応力比、降伏载荷回数とも増加し、土の強度が増加する傾向にあることも明確である。

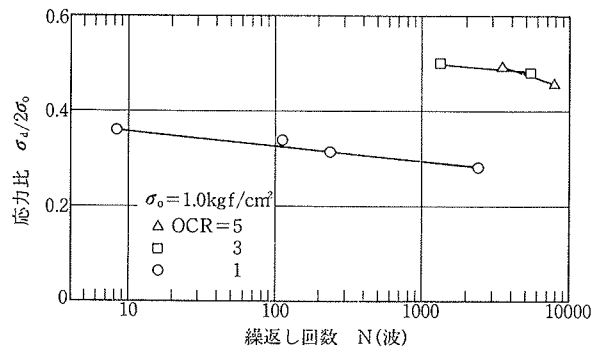


図-12  $\sigma_d/2\sigma_0$  と  $N_y$  の関係

さて、近年、地盤を含んだ構造物の地震応答解析が一般化するにつれ、実際の地盤の土の動力学特性を反映した土の動力学モデルの必要性が強く叫ばれるようになってきた。代表的なモデルをあげれば、Bi-linear モデル、Ramberg-Osgood モデル、Hardin-Drnevich モデルなどである。このうち、Ramberg-Osgood モデルについての検討を試みたので以下に記す。

Ramberg-Osgood モデルは図-13のように示され、せん断応力  $\tau$ 、せん断ひずみ  $\gamma$  の間に成り立つ骨格曲線は(1)式のようになる。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left( 1 + K \left| \frac{\tau}{G_0} \right|^{R-1} \right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $G_0, R, K$  は定数で、 $G_0$  は最大剛性率である。この骨格曲線上の任意の点  $(\tau_a, \gamma_a)$  における割線係数を  $G$  とすると(1)式は(2)式のように書き換えられる。

$$G = \frac{G_0}{1 + K \left| \frac{\tau_a}{G_0} \right|^{R-1}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(2)式は、定数  $G_0, R, K$  が分かれば、任意の  $\tau_a$  から  $G$  が計算できることを示している。

そこで、図-1に示した  $G \sim \gamma$  の実測値と計算値との比較を試みることにした。三つの定数のうち、 $R$  と  $K$  の間には(3)式が成り立つといわれているので、

$$R = \frac{1}{3} \log K + 1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

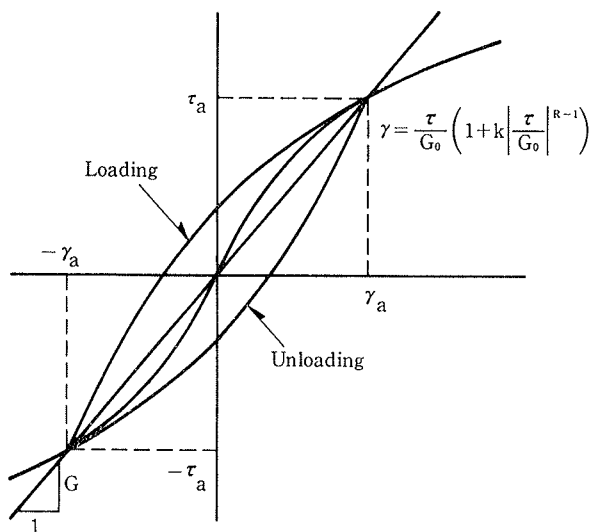


図-13 Ramberg-Osgood モデル

ここでは、下記の値を採用することとした。

$$R=3$$

$$K=10^6$$

$G_0$  については、OCR=1, 3, 5 のそれぞれにつき下記の値を採用した。

$$G_0=260 \text{ (OCR=1)}$$

$$G_0=400 \text{ (OCR=3)}$$

$$G_0=450 \text{ (OCR=5)}$$

こうして得られた Ramberg-Osgood 曲線と実測値の比較を示したのが図-14である。多少のばらつきはあるものの、定性的な傾向としてはほぼ妥当な曲線と思われる。

### 5. あとがき

砂の液状化応力比を求める際に、過剰間げき水圧による方法や、ひずみによる方法などさまざまな議論がなされているように、飽和粘性土の降伏基準としてこの報告で示した  $\gamma=5 \times 10^{-3}$  のひずみについても今後詳細な検討が必要となろう。また、このひずみレベルが段階載荷試験の  $G \sim \gamma$  関係で過圧密比の影響がなくなると判断されるひずみレベルに等しくなったことは非常に興味深い結果であった。

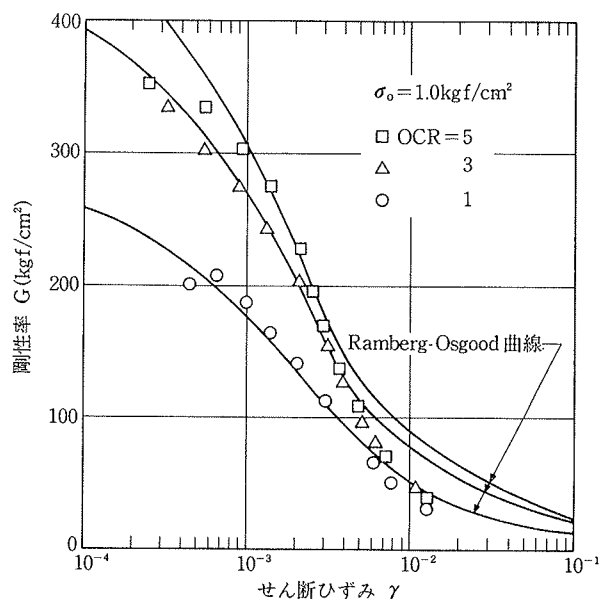


図-14 Ramberg-Osgood 曲線と実測値の比較

Ramberg-Osgood 曲線を求める上で最も重要なことは  $G_0$ ,  $R$ ,  $K$  という三つの定数をどのようにして求めるかということである。今回、この点については十分な考察をなし得なかったが、詳細については今後の研究課題としたい。

最後に、この研究の実施にあたっては、法政大学学生 谷口雄史、福田良宣両君の尽力に負うところが多いことを付記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 斎藤, 平間, 鳥井原: 粘性土の動剛性率と減衰定数の挙動について, 大林組技術研究所報, No. 20, (1980), pp. 40~44
- 2) 石原: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, (1976)
- 3) 小川, 柴山, 山口: くり返し応力を受ける飽和粘性土の力学的性質, 第8回土質工学研究発表会講演集, (1973), pp. 347~350
- 4) 杉本, 畑中, 辰己: 海底軟弱粘土の動力学特性と動的解析のためのモデル化, 第5回地震工学シンポジウム, (1978), pp. 713~720