

# 粘性土の動剛性率と減衰定数の挙動について (その3)

—広いひずみ領域での変形特性—

齋藤 二郎 平間 邦興  
鳥井原 誠

## Behaviors of Shear Modulus and Damping Ratio in Clay Soils (Part 3)

—Deformation Characteristics in Wide Strain Range—

Jiro Saito Kunioki Hirama  
Makoto Toriihara

### Abstract

It has long been recognized that the dynamic shear modulus ( $G$ ) and the damping ratio ( $h$ ) of saturated clays are extremely dependent on strain. In order to investigate this property, many types of dynamic test apparatus have been devised. The three types used in the tests reported here were dynamic triaxial test apparatus, resonant column test apparatus and electrodynamic triaxial test apparatus. By use of these apparatus, measurements of  $G$  and  $h$  were possible in a wide strain range.

Therefore, a comparison of test results is made with the Hardin-Drnevich model and the Ramberg-Osgood model which have been used most frequently of recent.

### 概 要

飽和粘性土の動剛性率 ( $G$ ) と減衰定数 ( $h$ ) には、大きなひずみ ( $\gamma$ ) 依存性があることは良く知られている。この特性を把握するために、現在まで種々の動的試験装置が開発されてきているが、今回、使用した試験装置は動的三軸試験機 (動三法)、共振法ねじり振動試験機 (共振法)、電磁力を利用した動電型動的三軸試験機 (動電法) の3種である。これらの試験機の使用により、微小ひずみから大ひずみまでの広いひずみ領域で  $G$ 、 $h$  の測定が可能であった。

そこで、得られた試験結果をもとに  $G$ 、 $h$  のひずみ依存性を、近年、よく用いられるようになった Hardin-Drnevich モデル (H-D モデル)、Ramberg-Osgood モデル (R-O モデル) で近似することを試みた。

### 1. まえがき

飽和粘性土の動剛性率 ( $G$ ) と減衰定数 ( $h$ ) には、大きなひずみ ( $\gamma$ ) 依存性があることは良く知られている。この特性を把握するために、現在まで種々の動的試験装置が開発されてきているが、それらの試験装置にはそれぞれ測定可能なひずみ範囲があり、対象とする地盤振動のひずみの範囲によって、適用する装置が異ってくる。

今回、使用した試験装置は動的三軸試験機 (動三法)、共振法ねじり振動試験機 (共振法)、電磁力を利用した動電型動的三軸試験機 (動電法) の3種である。これらの試験機の使用により、従来、動三法だけでは得られなかった微小ひずみから大ひずみまでの広いひずみ領域で  $G$ 、 $h$  の測定が可能であった。

そこで、得られた試験結果をもとに、 $G$ 、 $h$  のひずみ依存性を、近年、よく用いられるようになった Hardin-Drnevich モデル (H-D モデル)、Ramberg-Osgood モデル (R-O モデル) で近似することを試みた。

### 2. 試料

使用した試料は千葉県佐倉市白井で採取した軟弱な沖積粘性土を調整したものであり、これを軸圧  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  で長時間再圧密した。物理的性質を表-1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
4.3	26.2	69.5	2.66	73.2	34.8	38.4

表-1 試料の物理的性質

### 3. 実験方法

実験はすべてCU条件で、応力制御によるステージテストである。振動波形は正弦波、動三法と動電法の振動数は1 Hz、一段階の载荷回数10波である。

今回、微小ひずみ領域の測定に正確さを増すため、動的三軸試験機に図-1に示すように非接触型微小変位計を付加した。また、新しく図-2に示す動電型動的三軸試験機を開発した。これは、永久磁石を内包したリジットマス供試体上部に固定し、駆動電磁コイルによる電磁力で上下振動を発生させるものである。

供試体の形状寸法は動三法で  $50 \phi \times 125 \text{ mm}$ 、共振法、動電法で  $30 \phi \times 60 \text{ mm}$  であり、拘束圧は等方で、1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm<sup>2</sup> の4種である。

G, h の算出にあたっては、動三法と動電法では応力一ひずみ履歴曲線を、共振法では共振振動数、自由減衰曲線を用いた。

### 4. 結果と考察

図-3はGと  $\gamma$  の関係を示したものである。拘束圧が1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm<sup>2</sup> についての結果であるが、3種の試験結果とも実用的にはまずまずの対応を示している。図中の実線は動三法の試験結果に(1)式に示すH-Dモデルを適用して求めたものである。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad \dots\dots(1)$$

$G_0$ : 微小ひずみ時のG

$\gamma_r$ : 規準ひずみ

(1)式は、定数  $G_0, \gamma_r$  が与えられれば、任意の  $\gamma$  でのGが計算できることを示している。ここで、 $G_0, \gamma_r$  を求めるためには(1)式を(2)式のように変形する。

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_0 \cdot \gamma_r} \cdot \gamma \quad \dots\dots(2)$$

(2)式はH-Dモデルで1/Gと  $\gamma$  の間に直線関係があることを示している。そこで動三法の試験結果より1/Gと  $\gamma$  の関係を示したのが図-4である。各拘束圧で、両者の間には、ほぼ満足すべき直線関係が認められ、これらの直線の切片より  $G_0$  が、勾配より  $\gamma_r$  が求まる。この結果を表-2に

$\sigma'_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.0	2.0	3.0	4.0
$G_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	179	303	480	606
$\gamma_r (\times 10^{-3})$	1.65	2.05	1.20	1.76

表-2  $G_0, \gamma_r$  結果

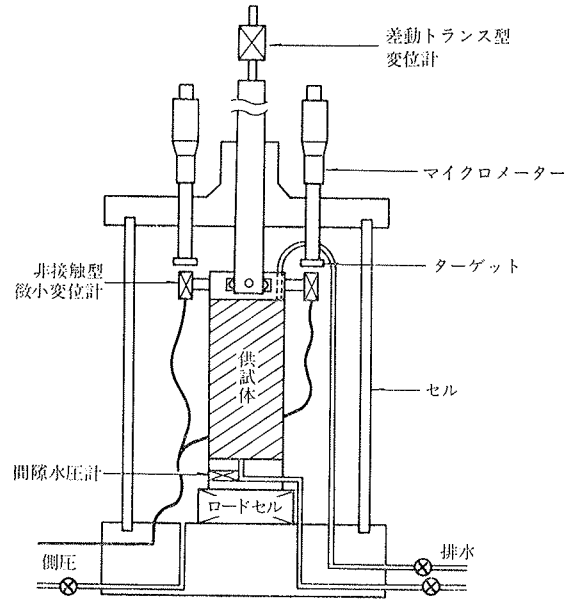


図-1 非接触型微小変位計 (動的三軸試験機)

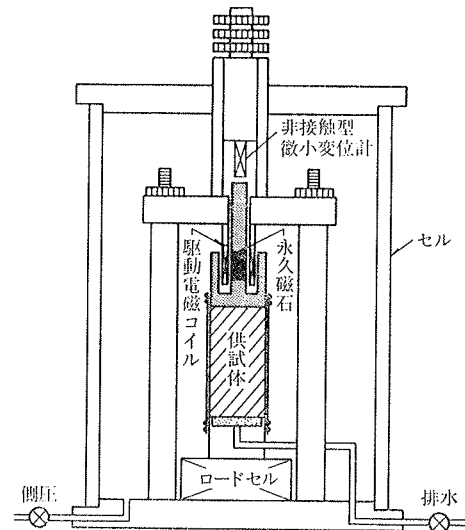


図-2 動電型動的三軸試験機

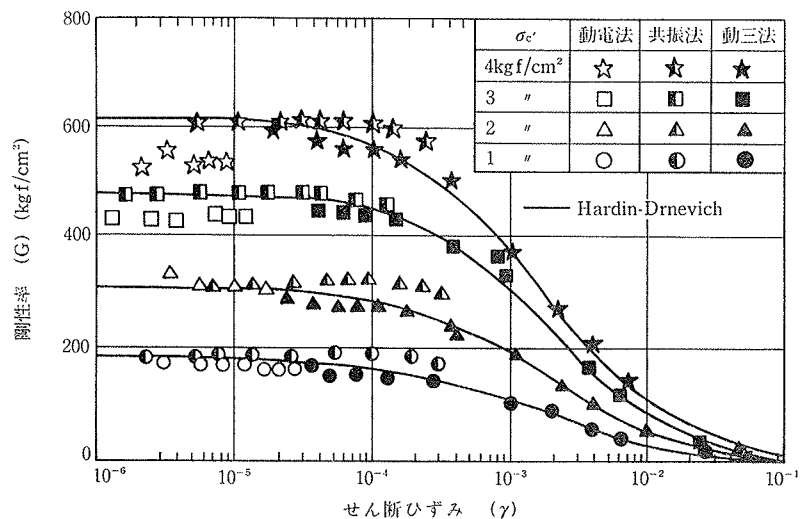


図-3 G と  $\gamma$  の関係

一括して示す。

こうして得られた、それぞれの  $G_0$ ,  $r_r$  を用いて拘束圧ごとに  $G \sim r$  関係を示したのが図-3の実線である。これらの実線は試験結果との対応も比較的良好であり、動三法の試験結果より推定した  $G_0$  も共振法の試験結果より得られる  $G_0$  と良い一致を示している。

図-5はすべての拘束圧の下での  $h$  と  $r$  の関係を示したものである。拘束圧の影響は顕著にはみられないが、共振法と動三法の試験結果は良い対応を示している。図中の実線は拘束圧が  $1 \text{ kgf/cm}^2$  の動三法の試験結果に(3)式で示す H-D モデルを適用して求めたものである。

$$h = h_0 \left( 1 - \frac{G}{G_0} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$h_0$ : 最大減衰定数

(3)式は H-D モデルにおいては、 $h$  と  $G$  の間に直線関係があることを示している。そこで、今回の動三法の試験結果から  $h$  と  $G$  の関係を示したのが、図-6である。各拘束圧で、両者の間には、ほぼ満足すべき直線関係が認められ、これらの直線の切片より  $h_0$  が求まる。この結果を表-3に一括して示す。

$\sigma_c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.0	2.0	3.0	4.0
$h_0$ (%)	16.3	15.4	14.7	16.5

表-3  $h_0$  の結果

こうして得られた  $h_0$  と図-4より求まる  $G_0$  を用いれば(1), (3)式より任意の  $r$  での  $h$  が計算できる。図-5の実線はこうして求めた  $h \sim r$  関係である。実際の試験結果と比較すると、微小ひずみ領域での対応はあまり良くないようである。

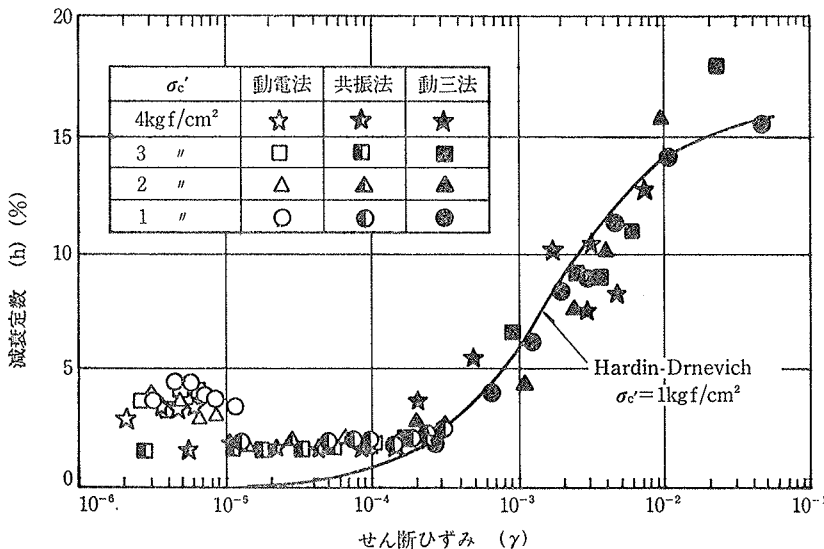


図-5  $h$  と  $r$  の関係

図-7は  $G \sim r$  関係について、前述した H-D モデルに加えて(4)式による R-O モデルを示したものである。

$$G = \frac{G_0}{1 + K|G \cdot r / G_0|^{R-1}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

K, R: 定数

(4)式は、実数  $G_0$ , K, R が与えられれば、任意の  $r$  から  $G$  が計算できることを示している。 $G_0$  は表-2の値を採用するものとして、K, R は動三法の試験結果に杉本<sup>2)</sup>らの手法を適用して求めた。この結果を表-4に一括して示す。

$\sigma_c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.0	2.0	3.0	4.0
K	154	98	65	131
R	1.69	1.64	1.62	1.70

表-4 K, R の結果

これらの値を使って求めた R-O 曲線は図-7の1点鎖線で示してあるが、試験結果と良好な対応があるとは言いがたい。

そこで、K, R の値について以下のような検討をおこ

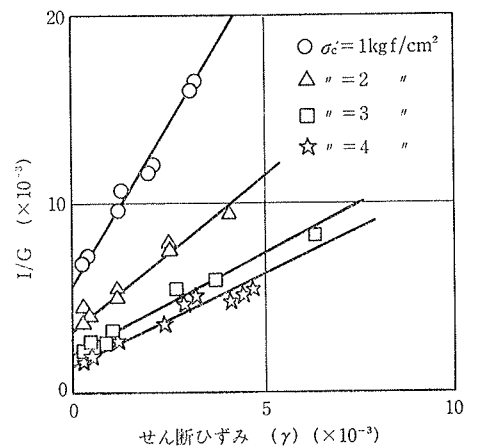


図-4  $1/G$  と  $r$  の関係(動三法)

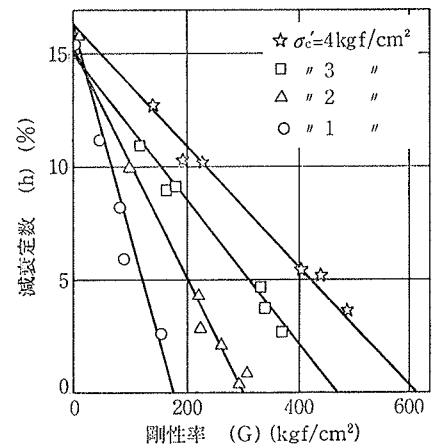


図-6  $h$  と  $G$  の関係(動三法)

なった。杉本らによれば、KとRには(5)式に示す関係があるといわれている。

$$R = \frac{1}{3} \log K + 1 \quad \dots\dots(5)$$

図-8は、今回の試験結果より得られたKとRの関係と(5)式から得られる直線を示したものである。多少のバラツキはあるものの、(5)式の妥当性はほぼ満足していると判断できる。

そこで、R-O 曲線が試験結果により近似するように、(5)式で  $R=3$ 、 $K=1 \times 10^6$  と仮定して求めたのが図-7の点線である。RとKの決め方に問題は残るが、ほぼ試験結果と対応したR-O 曲線が得られている。

図-9は  $h-\gamma$  関係について H-D モデルに加えて、(6)式による R-O モデルを示したものである。

$$h = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{R-1}{R+1} \left( 1 - \frac{G}{G_0} \right) \quad \dots\dots(6)$$

(6)式は  $h_0 = 2(R-1)/\pi(R+1)$  とすれば、(3)式とまったく同じ意味を持つ。

図-9の一点鎖線は、試験結果より得られるK, Rを使って求めたR-O 曲線であるが、 $G-\gamma$  関係と同様に試験結果との対応はあまり良好とはいえない。そこで、 $R=3$ 、 $K=1 \times 10^6$  と仮定して求めたのが、図中の点線である。ただし、 $h_0$  は表-3の値をそのまま採用している。

### 5. あとがき

G, h のひずみ依存性を広いひずみ範囲で把握することについては、各種の試験結果ごとの整合性など、非常に多くの困難な問題が存在している。そんな中で、今回、

3種類の試験手法を採用したところ、完全とはいえないまでも、ほぼ満足できる結果を得ることができた。そこで、これらの試験結果に H-D モデル、R-O モデルの適用を試みたのであるが、H-D モデルの方がより良い傾向を示したといえるようである。

最後に、この研究の実施にあたっては、法政大学学生、熊谷一二三、浜康之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

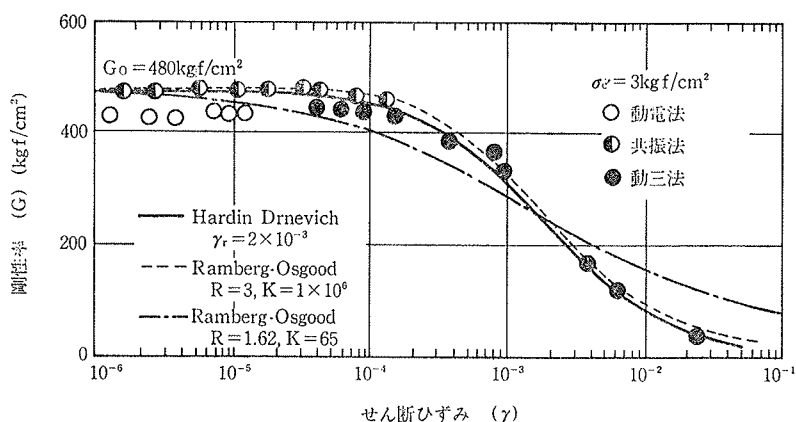


図-7 G- $\gamma$  関係のモデル曲線

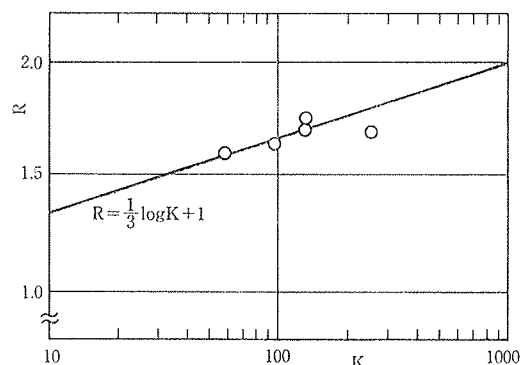


図-8 KとRの関係

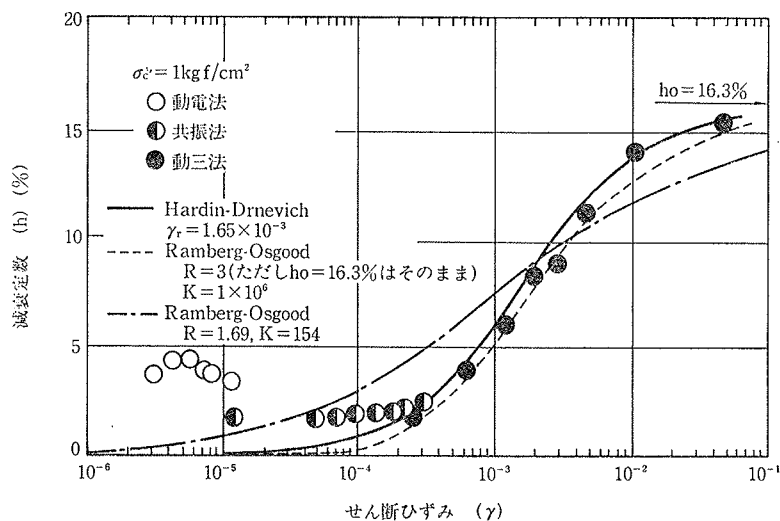


図-9  $h-\gamma$  関係のモデル曲線

の挙動について (その1), (その2), 大林組技術研究所報, No. 20, (1980), pp. 40~44, No. 22, (1981), pp. 87~91

2) 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