

小さなヒズミ領域における粘性土の動弾性係数

齋藤 二郎 後藤 洋三
木村 薫

Dynamic Shear Modulus of Elasticity of Cohesive Soils in Small Strain Regions

Jiro Saito Yozo Goto
Kaoru Kimura

Abstract

A new type test apparatus was made to measure the dynamic shear modulus of elasticity of soil which is necessary in earthquake response analysis of ground motion. This apparatus has some weak points in the control system of test conditions, but has special features such as high sensitivity in strain measurement (i.e., up to 10^{-5}) and the wide range in frequency (i.e., 0.2~30 Hz).

Two kinds of cohesive soils were tested. The test results were analyzed to show the relations between the strain amplitude and the shear modulus or the equivalent damping coefficient and also the fatigue effect from repeated shearing on the shear modulus. Consequently, conclusions similar to that of the works of Seed¹⁾ or Shibata²⁾ were reached and a method of setting the dynamic elastic limit and applying the elasto-plastic theory to earthquake response analysis of ground was indicated to be available.

概 要

地盤の地震応答解析に必要な土の動せん断弾性係数 G_d を測定するために試験装置を試作した。この装置は試験条件の制御機能等に欠陥を有するが、耐震的に重要な 10^{-3} ~ 10^{-5} の小さなヒズミレベルと 0.2~30.0Hz の広い振動数で加振が可能である。二種の粘性土について実験を行い、 G_d ならびに等価減衰常数とヒズミの大きさの関係、および繰返しせん断と劣化の関係について解析を行った。その結果、^{1)Seed} あるいは^{2)柴田}等の研究と同様の結論が得られるとともに、地盤に動弾性限界を設定した弾塑性地震応答解析の有意性が明らかとなった。

1. まえがき

動的な耐震設計法が広く採用されるにしたがい、地盤あるいは地盤と構造物連成系の振動解析がしばしば行なわれるようになった。それらの解析においては、解法上の制約から地盤は弾性体と仮定されることが多く、地盤の特性は密度と動弾性係数によって表現されている。地盤の動弾性係数の中で解析上の基本となるものは動せん断弾性係数 G_d である。しかし、その値は同一の土であってもヒズミの大きさ、拘束圧、含水比等によって変化することが確かめられており、地盤には一定値としての動弾性係数は存在しないと考える必要がある。現在、 G_d を決定する現位置試験として弾性波速度の測定がしばしば行なわれているが、この測定から得られる G_d は微小ヒズミ (10^{-6} 以下) に対応する値である。しかるに、大地震時の地盤に発生するヒズミの大きさは 10^{-3} ~ 10^{-4} になると推定されており、弾性波試験による G_d の値をそのまま大地震時の

解析に用いることは適当でない。

さて、ヒズミの大きさと G_d の値に注目した研究はすでに数多く報告されており、^{1)Seed} や^{2)柴田}等によって点在する測定例をまとめる努力もなされている。また、当面する耐震設計のためには弾性波試験で求めた波速を $1/2$ ~ $1/3$ にして G_d を算出すべきであるとの提案もなされてきた。しかし、弾性波試験時のヒズミから地震時のヒズミまでの小さなヒズミレベル (10^{-6} ~ 10^{-3}) においてヒズミの大きさと G_d の関係を連続的に測定した例は数少ない。そこで、著者等は小さなヒズミレベルを対象とした試験装置を試作し、二種の土について測定実験を行った。

2. 試作装置の概要

装置の機能が満たすべき条件として次の諸点を考慮した。

- (1) 10^{-5} ~ 10^{-3} のヒズミ振幅で測定が可能なこと。
- (2) 0.2~30Hz の振動数で測定が可能なこと。

- (3) 単純な応力発生機構であること。
 (4) 改良を前提とし、最初は簡単な構造とすること。
 その結果、試作した装置には主に次の点で制約がある。

- (1) 拘束圧の制御ができない。
 (2) 圧密ならびに排水、非排水の制御ができない。
 (3) 粘性土にしか適用できない。
 (4) 不覚乱の供試体作成が難しい。

試作装置の全景を写真一に示している。図一はその説明図である。同図から明らかなように、内管①と外管②の間にドーナツ状の供試体③がはさまれている。この状態から④の動電型加振器によって外管を上下に振動させる。外管と内管の間に発生する相対変位は⑤の変位計で測定し、内管に作用する力は⑥のロードセルで測定する。動電型加振器は最低 5.0×10^{-4} mmの振幅で加振することが可能であり、振動数も0.2Hzから10kHzまで可変である(ただし、装置に共振現象が生じるため、30Hz以上の測定はできない)。変位計は抵抗線ヒズミゲージタイプ5gr荷重計を改造したもので、 3×10^{-4} mmの振幅まで検出可能である。ロードセルは半導体ヒズミゲージを用いたもので荷重の作

用に対するセルの変形は微小であり無視できる。

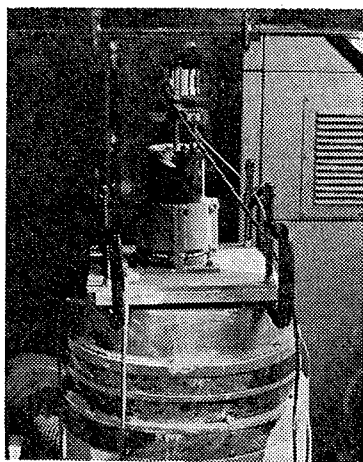
3. 供試体の製作と取付法

供試体の製作方法は種々考えられるが、本研究では次の方法を取った。

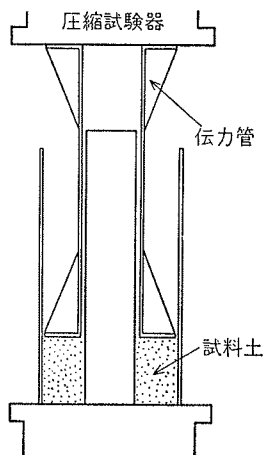
- (1) まず試料土を細かくほぐす。
 (2) 内管と外管をセットし、その間にほぐした試料を3cm程まきだす。
 (3) まきだした試料を 1 kg/cm^2 の圧力で密実になるまで圧縮する。
 (4) (2)~(3)の過程を試料長が約18cmになるまで繰返す(図一参照)。

供試体を試験装置に取付る方法は次の通りである。

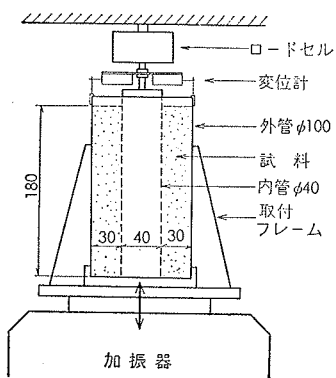
- (5) (4)の状態から内管を抜きとり、土性の安定化をはかるため24時間以上放置する。
 (6) 外管のみで保持した供試体を加振器上に取り付ける。そして内管のかわりに $\phi 19$ のアルミ管を挿入し、ロードセルと変位計を取付ける。
 (7) 供試体内壁とアルミニウム管の隙間を石コウで固定する(図一参照)。この取付法を取ることで偏心荷重等の発生を防ぐことができる。



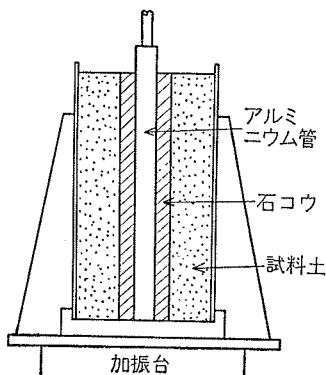
写真一



図二



図一



図三

沖積粘土

試料土物理特性		
基本性質	粒子比重 G	2.65~2.75
	砂分 S (%)	5~15
粒度	シルト M (%)	30~55
	粘土 C (%)	35~45
稠度	液性限界 Lw (%)	90~120
	塑性限界 Pw (%)	35~60
	塑性指数 Iw (%)	30~85

試料土(不覚乱)力学特性

せん断	一軸圧縮強さ q_u (kg/cm^2)	0.15~0.20
-----	-----------------------------------	-----------

表一

関東(立川)ローム

試料土物理特性		
基本性質	粒子比重 G (%)	2.728
	砂分 S (%)	33
粒度	シルト M (%)	51
	粘土 C (%)	16
稠度	液性限界 Lw (%)	149
	塑性限界 Pw (%)	66
	塑性指数 Iw (%)	83

試料土(不覚乱)力学特性

せん断	一軸圧縮強さ q_u (kg/cm^2)	1.7~1.8
-----	-----------------------------------	---------

表二

4. 試験方法

4.1. 試料土

試料土としては超軟弱な沖積粘土と関東ローム（立川ローム）を用いた。それぞれの物理特性を表一、表二に示している。沖積粘土は広島県福山市の埋立地から採取したものであり、関東ロームは当技研の敷地内から採取したものである。

4.2. 測定方法と回数

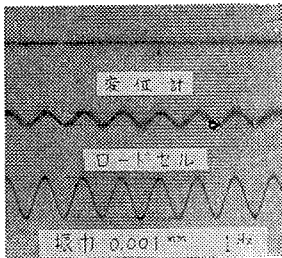
本試験に用いた供試体の個数は沖積粘土が3個、関東ロームが2個である（予備実験用としては多数の供試体を製作している）。沖積粘土3個、関東ローム1個については振動数とヒズミの大きさをパラメーターに取った実験を行った。すなわち、微小振幅から大振幅へと段階的にヒズミを増加させ、各振幅毎に0.25～30Hzの振動数で加振した。関東ロームの他の1個はやはり段階的にヒズミを増加させたが、振動数は1.0Hzで一定とし各振幅毎に最高10分まで加振して疲労による土の劣化を測定した。

4.3. G_d とヒズミ γ の算出

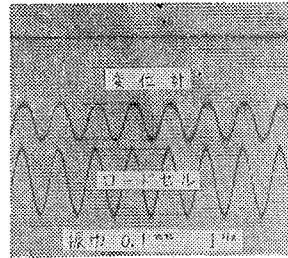
写真一2と写真一3は測定記録の一例を示したものである。この記録を読み取ることによって内管反力 P と相対変位 $\Delta\chi$ が求まる。 P と $\Delta\chi$ から G_d と γ を算出するためには、試料土に作用するヒズミとセン断力の分布が試料の半径方向に一様でないことを考慮して平均値を取ることとし、次式を用いた。

$$G_d = \frac{P}{\Delta\chi} \frac{\log \gamma_2 - \log \gamma_1}{2\pi l}; \quad \gamma = \frac{P}{4\pi l G_d} \left(\frac{\gamma_2 + \gamma_1}{\gamma_2 \gamma_1} \right)$$

γ : ヒズミ振幅 P : 内管反力
 $\Delta\chi$: 相対変位 l : 試料長
 γ_2 : 外管半径 γ_1 : 内管半径



写真一2



写真一3

5. 試験結果と考察

5.1. 沖積粘土について

図一4、一5、一6は G_d と γ の関係を片対数でプロッ

トしたものである。いずれの結果も $\gamma < 10^{-4}$ で G_d は一定値に近づく傾向を示し、 $\gamma > 10^{-4}$ では γ の増加に対し急激に減少する傾向を示している。一方、振動数が増加すると G_d は増加しており γ が小さい程その傾向も著しいが、 γ の影響に比較すれば小さい。

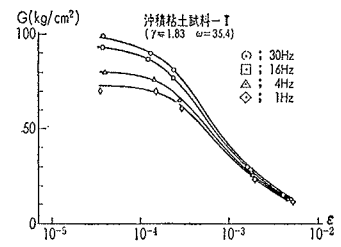
図一6の供試体については、外管に小さな衝撃を与えることによってセン断波の速度測定を行なった。すなわち、外管に取付けた加速度計と内管のロードセルによって衝撃波の立上りを記録しその時間差から速度を求めた。写真一4は時間軸を引伸した記録をペン書きオシロで再生して衝撃波の立上りを示したものである。セン断弾性波速度 V_s と G_d の間には次式の関係がある。

$$G_d = \rho V_s^2$$

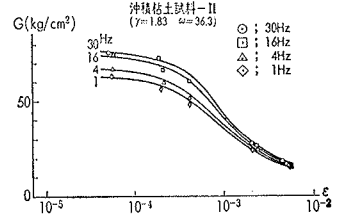
$$\left(\begin{array}{l} \rho = \mu/g \\ \mu : \text{単位体積重量} \end{array} \right)$$

上式から求めた G_d を図一6に合せ示しているが、先に求めた G_d の微小ヒズミにおける値とよく一致している。

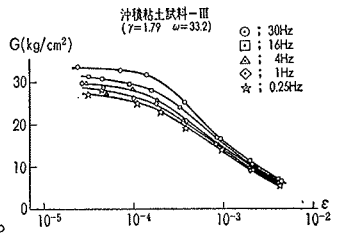
さて、以上の結果を柴田等の考え¹⁾にしたがって整理し各試料別に $G_d/G_0 \sim \gamma/\gamma_0$ の両対数曲線を作成した。図一7～図一8がその結果である。 G_0 は図一4～図一6において各曲線を微小ヒズミ側に延長した極限値であり、 γ_0 は各曲線の急曲点に対応するヒズミで動弾性限界を意味すると考えられる。このような整理を行うと振動数による差異はほとんど現われな。したがって、 $G_d \sim \gamma$ の定性的関係は振動数に無関係と考えることができる。柴田等の研究によれば粘性土の γ_0 は $2.0 \sim 7.0 \times 10^{-4}$ とされており、本研究の測定例もその範



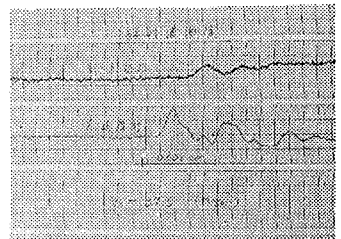
図一4



図一5



図一6



写真一4

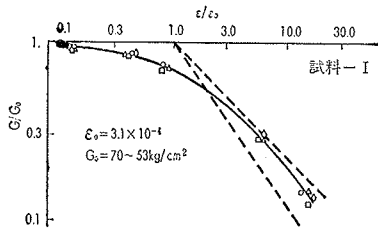


図-7

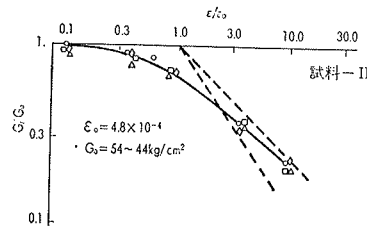


図-8

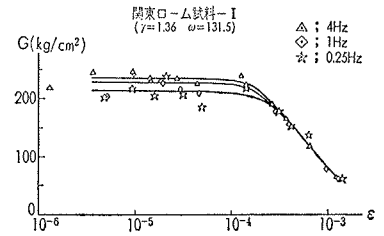


図-9

囲に入っている。

5.2. 関東ロームについて

図-9は第1の供試体について G_d と γ の関係を片対数でプロットしたものである。先の測定例と比較するとデータにばらつきがみられるが、 $\gamma < 10^{-4}$ では G_d が一定値となる傾向が顕著に現われている。同図から γ_0 として 2.0×10^{-4} なる値が得られた。図-10、-11は変位計とロードセルの出力を X-Y プロッターで図化した履歴曲線である。振幅の増加にともなって履歴曲線の形状が変化し、エネルギー損失が大きくなっている。この履歴エネルギー損失から等価粘性減衰常数を求め、 γ に対して整理したものが図-12である。減衰常数は動弾性限界 γ_0 をこえると急激に増加する。

図-13は第2の供試体について繰返しセン断による土の劣化（剛性低下）状況を測定したものである。 $\gamma < 2.0 \times 10^{-4}$ では劣化がみられず $\gamma > 8.0 \times 10^{-4}$ で劣化が現れている。第1の供試体から求めた γ_0 は 2.0×10^{-4} であり、劣化発生ヒズミ限界は動弾性限界 γ_0 と近い関係にあると想像される。

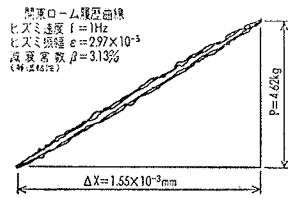


図-10

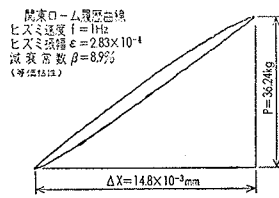


図-11

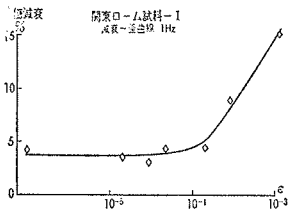


図-12

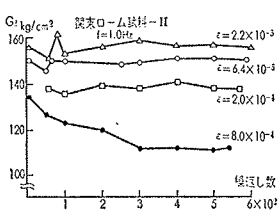


図-13

6. 結論

- (1) 簡単な動セン断試験装置を試作した結果、小さなヒズミ ($10^{-3} \sim 10^{-5}$) と幅広い振動数 (0.2 ~ 30 Hz) で粘性土の G_d を測定することができた。
- (2) しかし、試作装置では拘束圧、圧密、排水条件等の制御ができず不覚乱の供試体製作も難しい。
- (3) 測定された動セン断弾性係数 G_d はヒズミが 10^{-4} 以下になると一定値に収束し、弾性波速度の測定から求められた G に近い値となる。
- (4) 振動数が増加すると G_d は増加する傾向を示すが、 G_d とヒズミの関係には影響しない。
- (5) 等価減衰常数はヒズミが 10^{-4} 以上になると急激に増加した。
- (6) (3)と(5)の結論および劣化試験の結果から、動弾性限界 γ_0 の存在を仮定することが可能となる。今回求めた γ_0 は 10^{-4} のオーダーであるが大地震時に地盤に発生するヒズミは 10^{-3} のオーダーに達すると報告されている。したがって、粘性土地盤の地震応答解析で非線形性を考慮するためには γ_0 を用いた弾塑性応答解析が有効であると考えられる。

7. 謝辞

本研究のまとめについて京都大学防災研究所柴田教授から助言をいただいた。また、実験に関して当技研小出職員の助力を仰いでいる。両氏に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Seed 他：Influence of soil conditions on ground motions during earthquake, Proc. ASCE, Vol. 95, 1969
- 2) 柴田他：土の動的セン断弾性係数について，土木学会第26回年次学術講演会講演集第3部，1970