

不飽和粘性土の動的変形特性に関する実験的研究

奥村 哲夫 ・ 大根 義男

Experimental Study on Dynamic Deformation

Characteristics of Unsaturated Clay

Tetsuo OKUMURA ・ Yoshio OHNE

人口的に締固めて作った不飽和土について動的三軸試験を行ない、その変形特性を議論した。その結果、飽和度の違いによって動的変形特性が著しく異なることが明らかとなった。

また、せん断弾性係数に影響を及ぼす要因は静的なせん断強度に含まれることが知れた。さらに、Virgin-TestとStage-Testの結果を検討した結果、両者の相違はほとんど認められず、Stage-Testを行なって簡単に動的変形特性を求め得ることが知れた。

1. はじめに

地盤や土構造物の耐震性を論議しようとする場合、地震時においてこの種の構造物がどのような挙動を示すかを予測する必要がある。このためには、その振動特性を十分な精度で見積るための解析手法が要求される。近年、電子計算機の大型化に伴ない、有限要素解析 (F. E. M.) が発達したが、この解析手法を用いて多くの研究機関で耐震性に関する研究が行なわれている。しかし、この種の解析手法を用いる場合、地盤や土構造物等のいわゆる土の動的諸性質、例えば、動的せん断弾性係数、減衰比、および動的ポアソン比、等を精度よく求めておく必要がある。

動的せん断弾性係数および減衰比に関する研究は兼ねてより国の内外を問わず多くの研究者によって行なわれて来た。その結果、砂質土に関する動的特性はほぼ究明されたと言えよう。しかし、粘性土については、現在のところ幾多の問題点が残されている。特に飽和度の相異によって、動的変形特性にどのような影響を及ぼすかを調べた研究は皆無に等しい。

フィルダムのような盛土構造物の振動解析を行なう場合、堤体材料は、同じ材料であっても、貯水状況や堤体内の場所によって飽和度が相当異なる (例えば上流側、下流側で浸水部が異なる)。したがって当然のことながら、その動的変形特性もその影響を受けることになる。本論は、三重県中里ダム築堤材料の動的変形特性 (せん断弾

性係数、減衰比など) について、飽和度の影響を調べたものである。試験は含水比の異なる供試体を作成し、せん断ひずみ量 10^{-4} ~ 10^{-2} の範囲において行なわれた。

2. 試料および供試体

実験に用いた試料は、中里ダム堤体材料(米野層)を粒度調整して得た粒径が4.76mm以下の砂質粘土ロームである。粒度曲線を図1に示す。

試料の物理的性質は比重 $G_s = 2.689$ 、液性限界 $LL = 32.9\%$ 、塑性限界 $PL = 17.5\%$ 、塑性指数 $PI = 15.4$ である。また、締固め試験および静的三軸圧縮試験 (圧密一非排水条件) の結果は図2および図3に示すとおりである。

表1 供試体性状

供試体	飽和度	乾燥密度	含水比	三軸試験 (c-u)	
	S_r	δd	ω	Ccu	ϕ_{cu}
	%	g/cm ³	%	kg/cm ²	度分
A	93.0	1.885	14.8	0.64	17 20
B	77.2	1.856	12.9	1.08	19 20
C	55.3	1.850	9.3	2.06	25 10

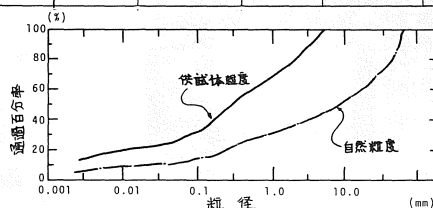


図1 粒度曲線

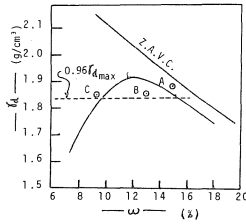


図2 締め固め曲線

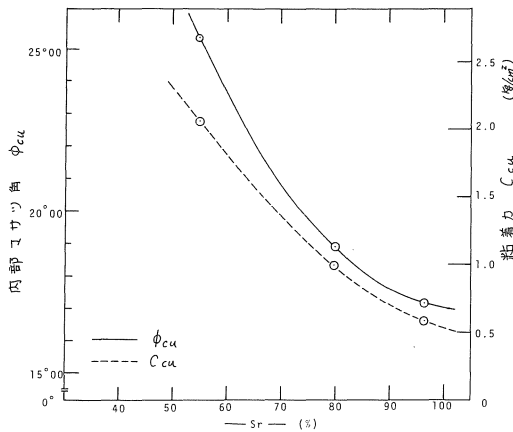


図3 内部マサツ角および粘着力と飽和度(Sr)の関係

供試体は飽和度を变化させるため、3種類の含水比を選び、締め固め試験より得られた最大乾燥密度の95%の密度となるように、圧縮試験機を用い、5層に分けた試料の表面を加圧することによって作成した。なお、各々の供試体の圧密後の含水比、飽和度および乾燥密度は表1に示すとおりである。なお、供試体の寸法はφ=50mm, h=125mmである。

3. 実験

本実験に使用した装置は図4および写真1に示すような電気油圧サーボ方式による振動三軸圧縮試験装置である。今回の実験においては軸方向のみ駆動させ、側方向の荷重装置は停止状態としている。

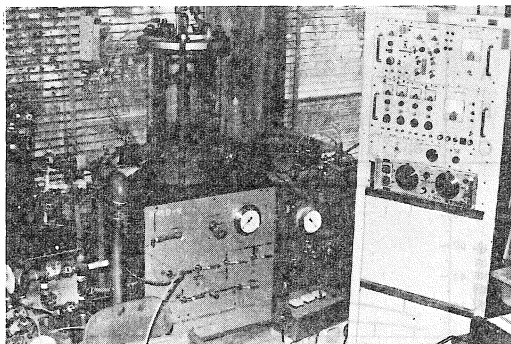


写真1 振動三軸圧縮試験装置の全景

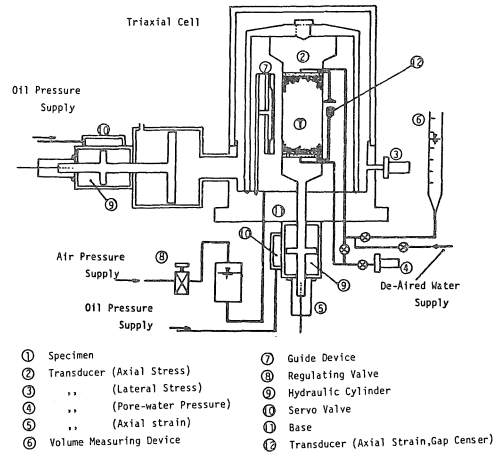


図4 振動三軸圧縮試験装置の概要

表2 実験条件

排水条件	圧密 - 非排水
制御方法	ヒズミ制御
波形	正弦波
振動数	3.0 Hz

実験は、拘束圧 $\sigma_0=1.0, 3.0$ および 5.0kg/cm^2 のもとで15時間圧密した供試体に対し、非排水状態で繰返し載荷を与えた。また表2に示すように、繰返し載荷の制御方法は軸変位制御であり、載荷波形およびその振動数は、正弦波 $f=2.0\text{Hz}$ である。載荷は300回載荷したものを第1段階とし(Virgin-Test)第1段階が終了後、さらにヒズミレベルを増大して次の段階載荷を行ない、1供試体に対し、供試体が破壊に近づいて実験が出来なくなるまで、数段階のヒズミレベルで実験を行なった(Stage-Test)。なお、次の段階へ移る場合は非排水状態とし、単に試料を圧縮しただけである。

測定は、検出器から得られた軸応力、軸変位および間げき水圧をデータレコーダーと電磁オッシログラフに同時記録して行なった。なお、軸変位の観測は精度を上げる目的から、防水加工した非接触式微小変位計(KK電子応用, AEC-5P20)を三軸セル内の試料台(ピストン頭部)と荷重計受圧部の間に設置して測定した。

4. 解析

電磁オッシログラフに記録した軸応力、軸変位および間げき水圧の1例を図5に、また1サイクル中の軸応力と軸変位の関係を図6に示した。

図6に示した応力~ひずみ履歴曲線および式(1), (2), (3)からせん断弾性係数G, せん断ひずみ γ および減衰比Dを求めた。

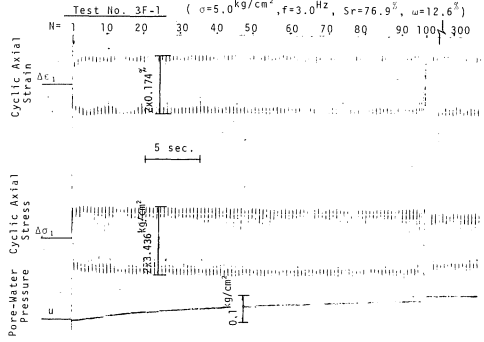


図5 電磁オシロ記録の一例

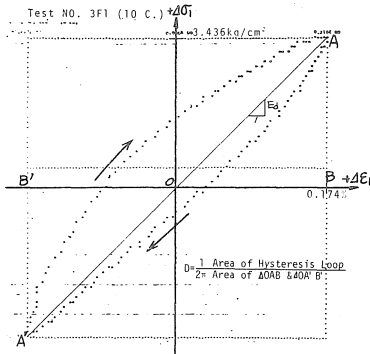


図6 応力履歴曲線の一例

$$E_d = \frac{\Delta \delta_1}{\Delta \epsilon_1} \quad \mu = 0.45 \text{ (仮定)}$$

$$G = \frac{E_d}{2(1+\mu)} \quad \text{--- (1)}$$

$$\gamma = \Delta \epsilon_1 (1+\mu) \quad \text{--- (2)}$$

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{ループの面積}}{(\Delta OAB + \Delta OBA) \text{の面積}} \quad \text{--- (3)}$$

なお実際のデータ処理には、図7に示すフローチャートに従い本学に設置してあるFacom 230-25、およびDatac2000を用いた。

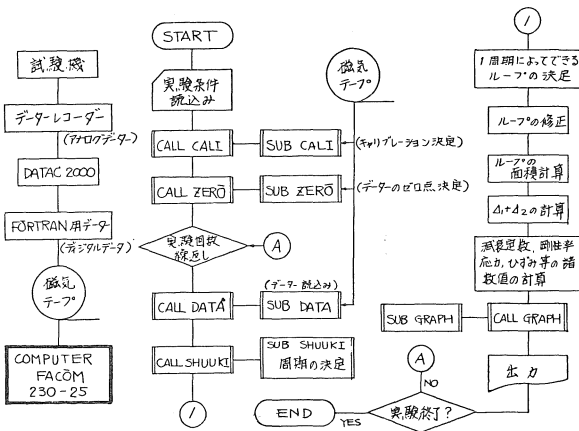


図7 フローチャート

5. 結果および考察

一般にせん断弾性係数Gおよび減衰比Dはひずみの大きさによって左右され、特に大ひずみにおいては、その依存性が高いことが知られている。また、ひずみ以外にせん断弾性係数および減衰比に影響を及ぼす主な要因としては、有効平均主応力 (σ'_m)、間げき比 (e)、繰返し载荷回数 (N)、飽和度 (S_r)、過圧密比 (OCR)、強度定数、時間効果、繰返し履歴など多くの因子が考えられる。本実験から得られたデータをもとに、载荷回数、拘束圧、飽和度、強度、繰返し履歴等がせん断弾性係数および減衰比に対しどのように影響を及ぼすかを調べた。第1段階の载荷で得られた結果 (V-Test) に関しては以下に示すとおりである。

5.1 せん断弾性係数

(a) せん断弾性係数のひずみ依存性について
本実験から得られたせん断ひずみ γ が $10^{-4} \sim 10^{-2}$ の範囲における γ とせん断弾性係数Gの関係を飽和度 $S_r = 93.0\%$ (A供試体), 77.2% (B供試体), および 55.3% (C供試体) の各々について示すと、図8のようになった。同図は载荷回数 $N = 30$ 目の代表的な結果である。図8から明らかなように、すべての供試体についてGの値は γ の増大に伴って減少しており、その傾向は初期有効拘束圧 σ'_v の大きなものほど、そして同じ初期有効拘束圧であっても飽和度の低いものほどGの低下は著しいことがわかる。さらに、Gの値は拘束圧が大きく、飽和度が

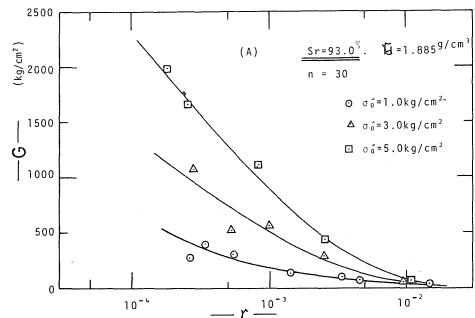


図8.1 セン断弾性係数(G)とセン断ヒズミ(γ)の関係

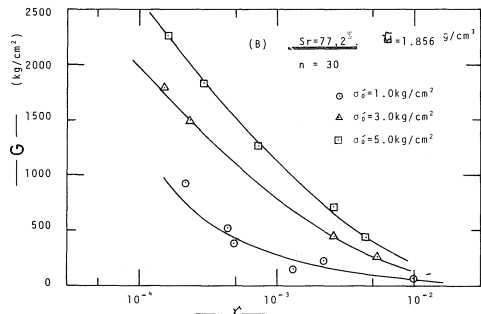


図8.2 セン断弾性係数(G)とセン断ヒズミ(γ)の関係

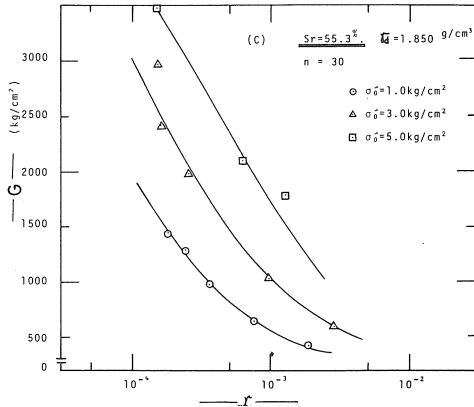


図 8.3 セン断弾性係数(G)とセン断ヒズミ(γ)の関係

低いものほど大きいことが知れる。

また、飽和度の異なったりいずれの供試体においても γ が $10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲において G に対するひずみ依存性の高いことがうかがわれる。

(b) セン断弾性係数に対する载荷回数の影響

10^{-3} 以上のヒズミレベルにおいて土は弾塑性的特性を示し、繰返しせん断の進行に伴って繰返し効果や速度効果が現われることが知られている。粘性土、特に飽和粘性土においては繰返し载荷による攪乱の影響を受けて間げき水圧が発生する。従って、土は軟弱化し、その力学的特性は著しく変化するものと考えられる。

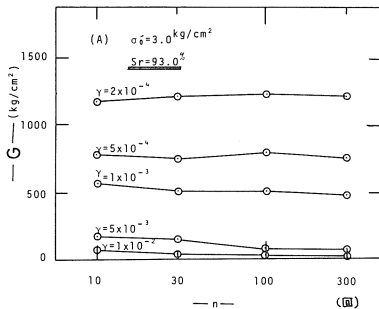


図 9.1 セン断弾性係数(G)と载荷回数の関係(A試料)

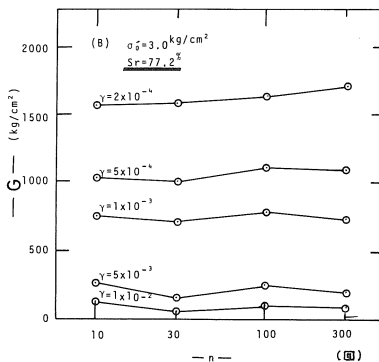


図 9.2 セン断弾性係数(G)と载荷回数の関係(B試料)

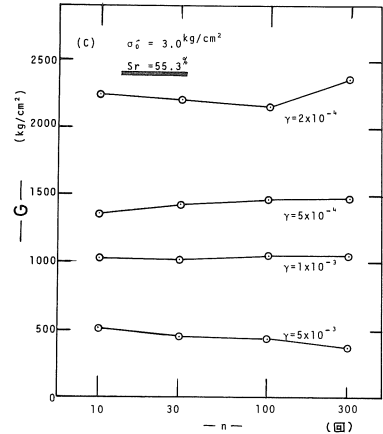


図 9.3 セン断弾性係数(G)と载荷回数の関係(C試料)

図9は初期拘束圧 $\sigma'_0 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ のもとで得られたせん断弾性係数と载荷回数の関係を各々の供試体ごとに示したものである。この図から、300サイクル程度の载荷回数ではせん断弾性係数の値にさほど変化はなく、データのバラッキを考えるとせん断弾性係数の値は $2 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$ のひずみの範囲においてほぼ一定であると考えられる。そしてこのことは、他の拘束圧の場合においても認められ、さらに図11に示すように 300サイクル目の間げき水圧の発生量が飽和度93%の場合、最大値 0.1 kg/cm^2 程度であることから一層明瞭である。

(C) セン断弾性係数に対する拘束圧の影響

図8に示した結果からわかるように、せん断弾性係数は拘束圧の影響を受け、あるせん断ひずみ γ に着目した場合、その値は拘束圧の増大と共に大きくなっている。せん断弾性係数と拘束圧の関係をより明確に表わした結果の1例が図10である。この図は30サイクル目のせん断弾性係数と有効拘束圧 σ' ($\sigma' = \sigma'_0 - w$) の関係を両軸とも対数で表わしたものである。ここで、有効拘束圧 σ' は

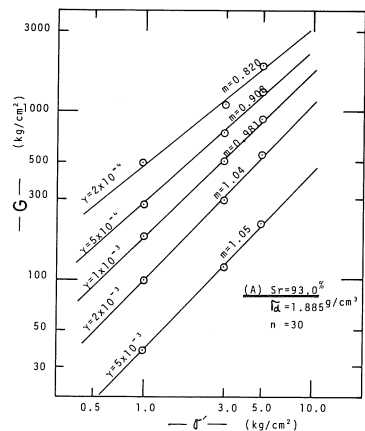


図10.1 セン断弾性係数と有効拘束圧の関係(A試料)

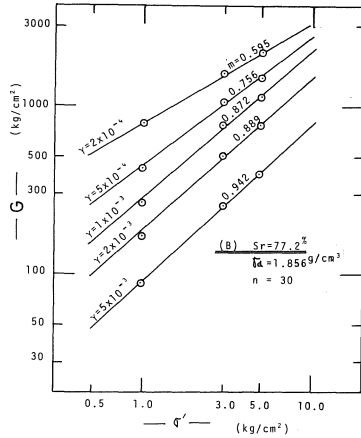


図10.2 セン断弾性係数と有効拘束圧の関係(B試料)

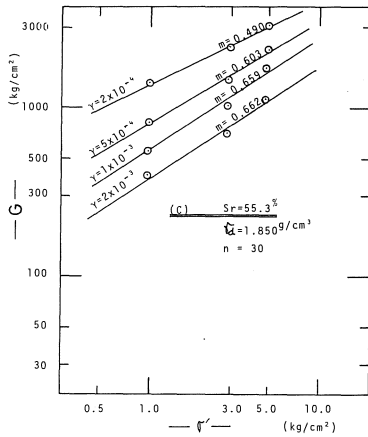


図10.3 セン断弾性係数と有効拘束圧の関係(C試料)

各々の実験点における30サイクル目の間げき水圧u から図11に示したu ~ γ の関係を用いて推定したものである。図10から本実験に用いた不飽和粘性土においても、砂質土に関するこれまでの結果と同様にGとσ'の関係は対数グラフ上で直線的に変化していることが認められる。

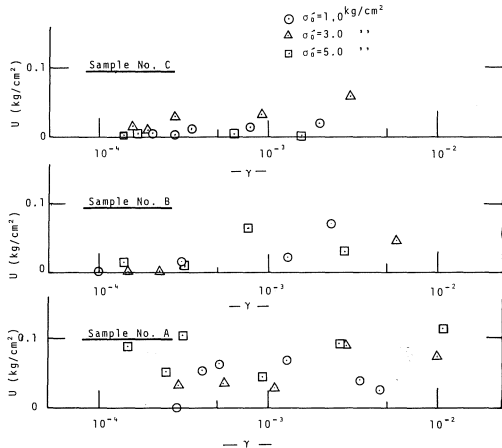


図11 繰り返し载荷によって発生した残留間ゲキ水圧 (n=300回)

このことから、この実験式は下記のように表わすことができる。

$$G = K \cdot \sigma'^m \quad (1)$$

ここで、Kおよびmの値は図12に示すようにひずみ依存性であることがわかる。また、同質の材料であっても飽和度によって異なっており、せん断弾性係数は飽和度の影響を受けることがはっきりとわかる。また、飽和度の高い試料ほどmの値が大きく逆にKの値は小さくなっている。

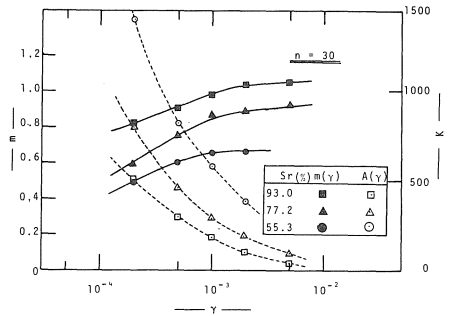


図12 mおよびKの値とせん断ひずみ(γ)の関係

(d) せん断弾性係数に対する飽和度の影響

図13はせん断弾性係数と飽和度の関係を各ひずみレベルに対して示したものである。図から飽和度の増大に伴ってせん断弾性係数の値は低下し、また、飽和度による影響はひずみが小さなほど著しいことがわかる。図には

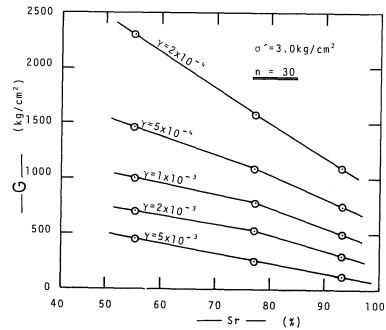


図13 セン断弾性係数(G)と飽和度の関係

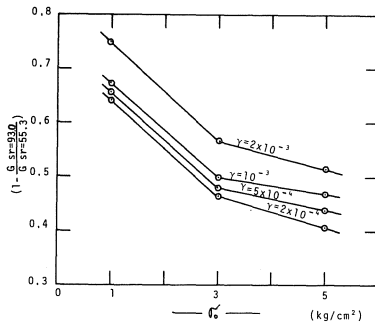


図14 減少率と初期拘束圧の関係

1例として $\sigma_0 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の結果を示したが、他の拘束圧においても同様の傾向が認められた。図14は各々の拘束圧の下で得られた飽和度 $S_r = 55.3\%$ と 93.0% のせん断弾性係数の値を比較するために、減少率 $(1 - \frac{G_{Sr=93.0}}{G_{Sr=55.3}})$ 、 $S_r = 55.3\%$ の G の値に対する $S_r = 93.0\%$ の G の減少率)と初期拘束圧の関係を示したものである。この図から、初期拘束圧の増大に伴って減少率は減少していることがわかる。さらに、同一拘束圧においてヒズミレベルが大きなものほど減少率は高くなっている。

以上の結果から、せん断弾性係数に対する飽和度の影響は、ヒズミレベルおよび拘束圧によって異なってくる事が知れる。

(e) せん断弾性係数に対する強度の影響

一般にせん断弾性係数は土の固さと密接な関係にあると考えられる。このことは、土の特性、例えば飽和度、密度等が異なっても強度的なパラメータを用いてせん断弾性係数を整理すれば、その特性を考慮した関係が得られるであろう。

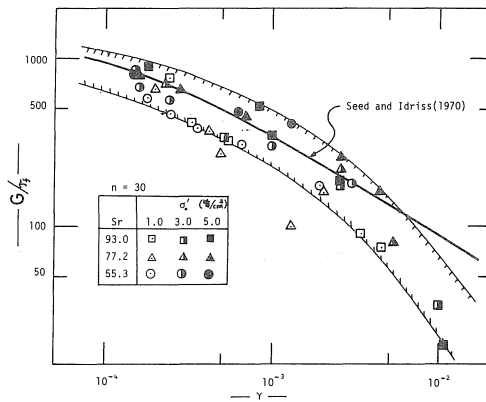


図15 G/τ_f とせん断ヒズミ(γ)の関係

図15は、飽和度および拘束圧が異なった条件の下で得られたせん断弾性係数の値をその状態のせん断強度 τ_f で除し、これとせん断ひずみの関係をプロットしたものである。ここで、せん断強度 τ_f はモール・クーロン式、 $\tau_f = C + \sigma \tan \phi$ から求めたものであり、 C, ϕ は表1に示した値、また σ は実験時の初期有効拘束圧 σ_0 である。データにはバラツキがあるが、せん断弾性係数を $G/\tau_f \sim \gamma$ 関係で整理すれば、飽和度や拘束圧の影響を取り除いた形で表わすことができると考えられる。なお図には、H.B. Seed他がまとめた数種類の飽和粘土の結果の平均値(実際には、この平均値に対し±50%のバラツキがある)も示しているが、両者の結果はよく一致しており、粘性土の一般的なせん断弾性係数の値を示しているものと考えられる。

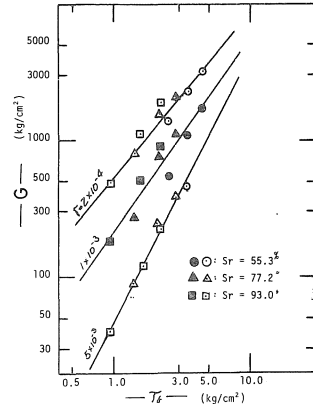


図16 せん断弾性係数と静的せん断強度(τ_f)の関係

図16は、せん断ひずみ $\gamma = 2 \times 10^4, 1 \times 10^3$ および 5×10^3 におけるせん断弾性係数の値を図8から求め、これと τ_f の関係を示したものである。図から、異なった飽和度および拘束圧で得られたせん断弾性係数とそのせん断強度は両対数グラフ上で直線関係にあり、この結果式(2)が得られる。

$$G = A \cdot \tau_f^n \quad (2)$$

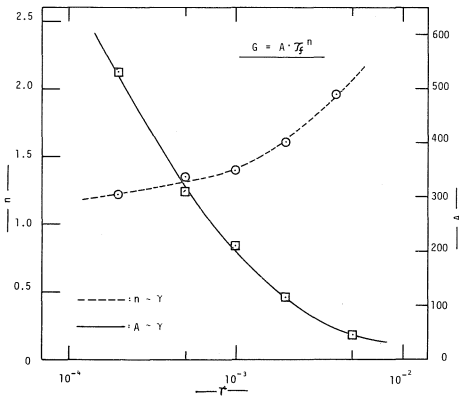


図17 nおよびAの値とせん断ヒズミ(γ)の関係

ここで、 A, n の値はヒズミレベルによって異なり、図17に示すようにせん断ひずみの増大に伴って n の値は増大し、 A の値は減少する傾向となる。

5.2 減衰比について

図18は30サイクル目の減衰比 D とせん断ひずみの関係を示したものである。図には飽和度、拘束圧によって異なった記号を用いて示しており、図から、いずれの飽和度の供試体においても、減衰比はせん断ひずみの増加と共に増大しており、ひずみ依存性であることを示している。また、拘束圧の影響はほとんどみられないが、飽和度についてはこの影響が幾分認められる。すなわち、飽和度

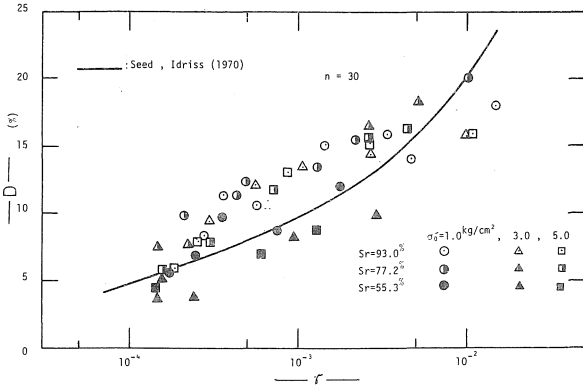


図18 減衰比(D)とせん断ヒズミ(γ)の関係

93.0%と77.2%の結果については減衰比の値にほとんど差がみられないが、飽和55.3%の場合の結果については、他の値と比較して5%程度低くなっている。また、この傾向は他の载荷回数においても認められた。なお、図にはSeed, Idrissが提案した飽和粘土の結果も示しているが、バラツキの幅が大きいため本実験から得られた値はすべての範囲にあり、飽和粘土との比較はできない。

5.3 V-TestとS-Testの比較

前項においては、第1階の载荷によって得られた結果(以後、V Testの結果と呼ぶ)について示した。そして载荷回数が300サイクル以内ではせん断弾性係数および減衰比はその影響をほとんど受けないことを示した。ここでは、第1段階以後の载荷によって得られたデータ(以後、この結果をStage-Testの結果と呼ぶ)を整理し、得られた結果をVirgin-Testの結果と比較した。

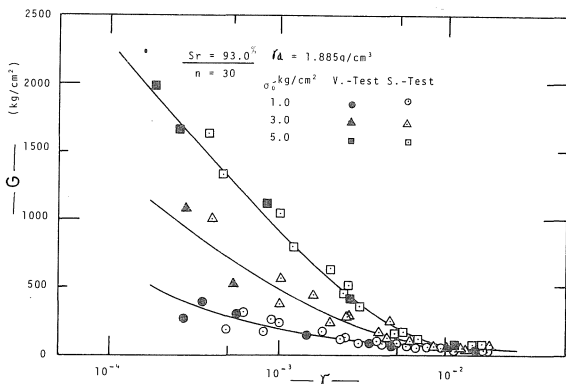


図19 V-TestとS-Testの比較(A供試体)

図19は、せん断弾性係数とせん断ひずみの関係を飽和度93.0%のものについて代表的に示したものである。図中の実線および、ぬりつぶした記号は図8に示したVirgin-Testの結果であり、これ以外の記号は各々のStage-Testで得られた30サイクル目の値を示している。

図からわかるように、Virgin-TestとStage-Testの結果には顕著な差はみられない。またこのことは他の飽和度の結果においても認められた。

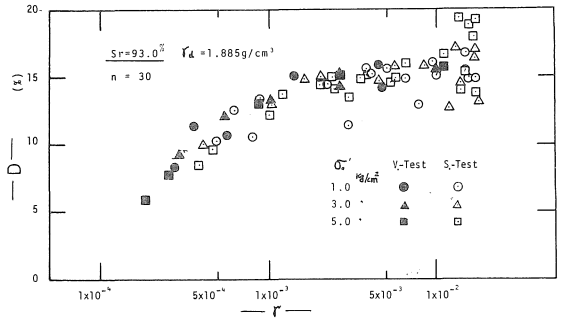


図20 V-TestとS-Testの比較(A供試体)

図20は減衰比について上記と同様な方法で整理した結果を示したものである。この図からもVirgin-TestとStage-Testの結果には著しい相異は認められない。

上記のように、Virgin-TestおよびStage-Testのせん断弾性係数と減衰比に関する実験結果はほとんど差が認められない。このことは、今回用いたような不飽和試料ではStage-Testを行なうことによって $G \sim \gamma$ 、 $D \sim \gamma$ の関係を簡単に求め得ることを示していると言えよう。

6. まとめ

粘性土、特に不飽和粘性土のせん断弾性係数および減衰比の測定は、ほとんどなされておらず、その影響要因は現在のところ明確ではない。本実験によって得られた結果から、せん断弾性係数と減衰比に関する不飽和粘性土の特性をまとめてみると以下のようなものである。

- 1) Virgin-Testの結果、およびVirgin-TestとStage-Testを比較した結果からは载荷回数の相異による影響はほとんど認められない。また、このことから、Stage-Testを行なうことによって、 $G \sim \gamma$ 、 $D \sim \gamma$ を簡単に求めてもよいと考えられる。
 - 2) せん断弾性係数と拘束圧の関係は、 $G = K \sigma_v^m$ の形で表わすことができる。そして、Kおよびmは飽和度によって異なった値を示す。
 - 3) せん断弾性係数とせん断強度の関係は、 $G = A \tau_f^n$ で表わすことができる。この場合の定数Aおよびnは γ だけに依存した値であり、実験式は式(1)と比較して非常に単純化した形となっている。
 - 4) 減衰比に対する拘束圧の影響は極めて小さい。しかし、飽和度に関しては幾分その影響があり、飽和度が高い試料ほど減衰比の値は大きい。
- 以上、動的諸係数、特にせん断弾性係数および減衰定

数についての実験結果を報告したが、この結果は本記要の“フィルダムの地震時の応答ならびに安定性に関する研究”で報告したフィルダムの振動解析の中で反映されている。

参考文献

- 1) 奥村, 大根 (1975) 両振り三軸試験機による飽和砂の液状化について
土木学会中部支部研究発表会
- 2) 宮武, 横山 (1977) 中里ダム現場起振実験について (その2)
第34回農業土木学会京都支部研究発表会
- 3) 奥村, 大根 (1978) 粘性土の動的変形特性について
第13回土質工学研究発表会
- 4) 水資源開発公団三重用水建設所 (1977) 中里ダム現場振動実験および解析
- 5) Seed, H. B and Idriss, I. M (1970) Soil Moduli and Damping factors for dynamic response analysis”, REPORT NO. ERRC 70-10
- 6) 石原研而 (1976) 土質動力学の基礎
- 7) Hara, A, Ohta, T, Niwa, M, Tanaka, S and Banno, T. (1974)
“ Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive soils”, Soil and Foundations, Vol, 14, No. 3
- 8) 大根, 建部, 村瀬 (1978) フィルダムの地震時の応答ならびに安定性に関する研究,