

建設省土木研究所 正員 龍岡文夫

学生員 高木義和

千葉工業大学

田山孝一

§ はじめに

地盤および構造物の動的荷重に対する応答を数値解析や模型実験を合理的に推測するためには、土のせん断弾性係数 G 、減衰係数が必要である。弾性波探査で生ずる歪は非常に小さい（ 10^{-6} 程度）。当所が開発した共振法土質試験機を用いると $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 程度の歪の範囲のせん断弾性係数、減衰係数を求めることができ、弾性波探査でのS波速度から求めた G と現地から採取した試料での共振法土質試験から求めた G とは、歪レベルを考慮するとよく一致することばかりである。一方、強震時の歪レベルは $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度であることが知られている。土の変形係数は歪レベルに強く依存するから、この歪の大きさでの土の変形係数を求めることが必要である。このために新たに写真1に示すような試験機（低周波動的せん断試験機と呼ぶ）を開発した。

§ 低周波動的せん断試験機の概要

本装置は、写真1に示すように、計測装置および歪制御装置（図中左）、試験機本体（中）、荷重制御装置（右）から成る。図-1に示すように、この試験機では内径6cm、外径10cm、高さ10cmの中空炭試体に周波数約0.1 Hzの繰返しねじり力を与え、この時のトルク力、回転角を測定することによって、せん断歪 $\gamma = 5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$ の歪の範囲の土のせん断弾性係数および、減衰係数を直接求めるものである。トルク力、回転角の測定に誤差が入らないように、両者共に炭試体直上のセルの中で測定した。側圧は空気圧で内圧と外圧が常に等しくなるようにして与え、軸荷重はこれとは独立に与えた。従って、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ 以外の応力状態も作ることができる。

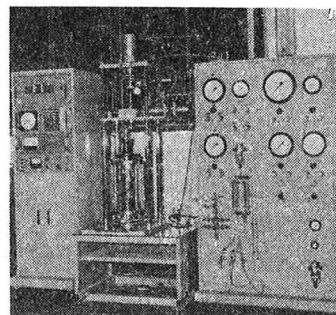


写真1. 低周波動的せん断試験機の概観

§ 実験方法

今回は、共振法土質試験機と低周波動的せん断試験機との結果の比較を目的として、密づめの豊浦砂で実験した。ここで用いた豊浦砂は $G_s = 2.64$ 、 $d_{10} = 0.12 \text{ mm}$ 、 $d_{60} = 0.75 \text{ mm}$ 、 $U_c = 1.46$ 、 $e_{max} = 0.96$ 、 $e_{min} = 0.64$ （ e_{max} 、 e_{min} は空気乾燥状態を求めた）である。空気乾燥砂の炭試体はモールド

内に入ブーンをどぞど込みモールドを木槌で叩くことにより作り、飽和砂の炭試体は、十分脱気した豊浦砂を水で満したモールド内に入ブーンで注ぎ込みモールドを木槌で叩くことにより作った。飽和炭試体の実験は排水状態で行った。表-1は実験リストである。共振法土質試験機の実験方法は

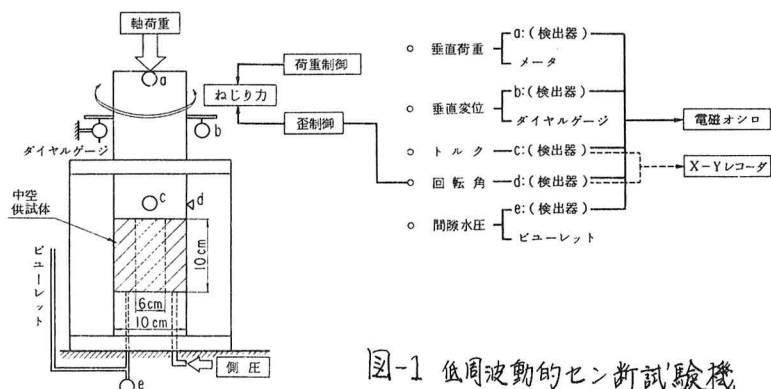


図-1 低周波動的せん断試験機のブロックダイアグラム

文献1を参照されたい。共振土質試験機では1つの供試体で各種の拘束圧の実験を行ない、低周波動的セン断試験では7つの供試体で1つの拘束圧の実験を次のようにして行、た。まず $\gamma=5 \times 10^{-5}$ 程度で荷重制御で $f=0.1$ Hzで、10回くりかえす。測定値は、図-1に示すように電磁オシロとX-Yレコーダで記録する。このようにして $\gamma=10^{-2}$ 程度まで何段階かの試験を行なう。

9 実験結果

図-2は、トルク力を縦軸、回転角を横軸としたときにX-Yレコーダで記録した典型的な応力～歪履歴曲線である。曲線の型はくりかえし回数の影響をうけることばかりである。図-3は典型的な実験結果を G についてまとめたものである。この場合は1から10までの8段階の実験を行っており、各段階で10回くりかえして行なった。荷重振幅一定なので、同じ荷重レベルに対してくりかえし回数の増大と共に、セン断歪振幅は減少していくこと表示されている。このグラフから、ある γ の値に対する $N=10$ の G の値を読みとって以下の整理に用いた。履歴減衰係数 η についても同様の整理を行な、た。低周波セン断試験機でこのようにして得られた $N=10$ の G と η の値と共振土質試験で得られた値を $p=1.0 \text{ kg/cm}^2$ について比較したのが図-4と図-5である。 G については、間隙比 e と平均主応力 $p=\frac{1}{3}(\sigma_1+2\sigma_3)$ の影響を消却するために G の値を、次の式で得られる G の値 G^* で除してある。

$$G^*=700 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} p^{0.5} \text{------(1)}$$

この式は、各種のきれいな砂の共振土質試験によ、 $\gamma=10^{-4}$ について成り立つことと確認されたものである(文献2)。図-4は、豊洲砂の G の値が両試験において飽和、乾燥によらないこと、又周波数の大きな違い(共振法 $f \approx 50 \sim 100$ Hz、低周波 $f=0.1$ Hz)及びくりかえし回数の大さな違い(共振法 $N \approx 2000 \sim 4000$ 、低

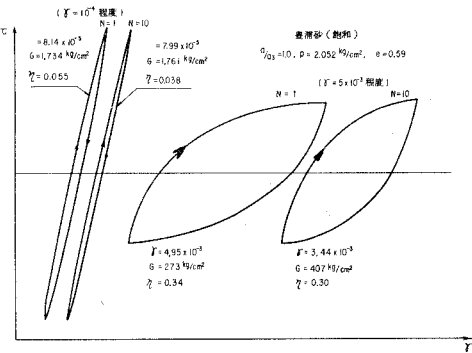


図-2. 典型的な応力～歪履歴曲線

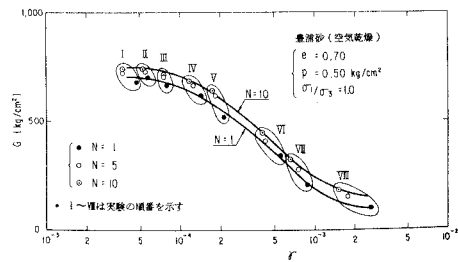


図-3. 典型的な実験結果

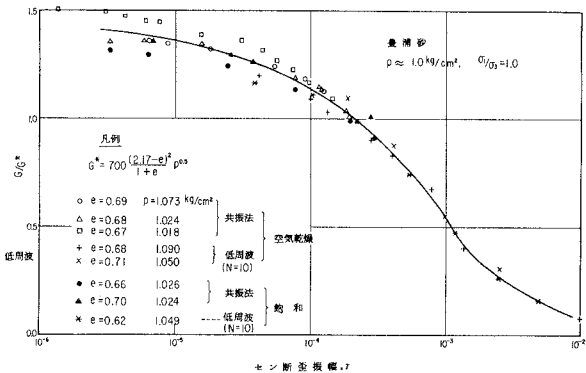


図-4. 低周波動的セン断試験と共振土質試験の比較(G)

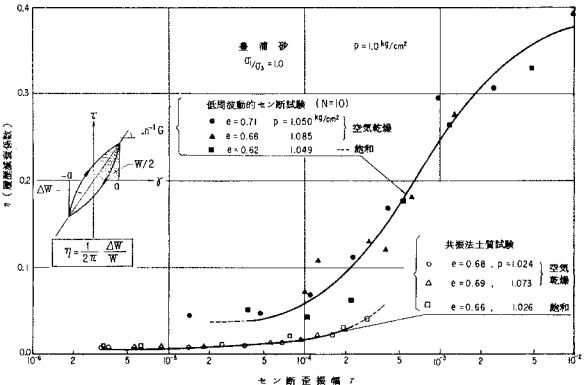


図-5. 低周波動的セン断試験と共振土質試験の比較(η)

周波 $N=10$)によらず両試験法による値が $\gamma=10^{-4}$ 付近でよく一致することを示している。他の拘束圧 p における G の値は図-6,7にまとめられている。図-6,7では、各試験の C の値は、若干のばらつきがあるものの式に従って G の値は $(2.17-e)^3/\gamma+e$ に比例するものとして $C=0.68$ の G の値に修正したものである。豊浦砂の G の値は、飽和、乾燥によらないこと、歪速度の影響がないこと、 $\gamma>10^{-4}$ で著しい歪依存性を持つていることが分かる。一方排水くりぬきセン断では同じ γ の値に対して G の値は、くりぬき回数 N の増大とともに増加していきことが知られている。図-10は $N=300$ まで行った低周波動的セン断試験における N の G の増加率; G_N/G_1 に及ぼす影響を示したものである。 $\gamma=10^{-4}$ においては、 $N=300$ でもほとんど G は増加していない。一方、共振法土質試験における G は $N\approx 2000\sim 4000$ における値である。従って $\gamma=10^{-4}$ において、 G はくりぬき回数の影響はほとんどないとすれば、図-4で $\gamma=10^{-4}$ 付近で、低周波動的セン断試験による G の値が、共振法による G の値より若干小さいだけであり、ほぼ一致していることは、自然なことと思われる。又、図-10に示してあるように $\gamma=10^{-4}$ より大きくなると G はくりぬき載荷によって大きく増加してゆくなり、 $N<10$ の G の値は図-4,6,7の $N=10$ の値よりも若干小さくなり、又、 $N>10$ の値は若干大きくなることに注意する必要がある。

図-5は、 $p=1.0\text{ kg/cm}^2$ における履歴減衰係数 η についてまとめたものである。低周波における η は $N=10$ における値である。 η の値は、共振法土質試験によると、 C の影響を受けないことが分かっているから、 η の C の値についての修正はしていない。又、データのばらつきが大きく、 p の 1.0 kg/cm^2 からのずれは小さいことから、 η の p についての修正もしていない。この図-5は、両試験とそれぞれにおいて、豊浦砂の η が飽和、乾燥によらないこと、又、 $\gamma>10^{-4}$ で η は急に大きくなることを示している。しかし、 G の場合と異なり、 $\gamma=10^{-4}$ 付近で両試験法による η の値が大きく異なっている。図-8,9は、他の拘束圧 p の値の場合を含めて η について整理したものである。 $\gamma=10^{-4}$ における両試験法による η の値の著しい差異は認められる。なぜ $\gamma=10^{-4}$ 付近で、低周波による η の値が共振法による値よりもはるかに大きいのであろうか。その原因として、①低周波動的セン断試験における、機械的誤差。②歪速度の違い。③くりぬき

表-1 実験リスト

豊浦砂 (飽和)				記号
共振法	RS1	$p=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$	$e=0.66$	$\triangle\triangle\triangle$
	RS2		$e=0.70$	$\bigcirc\bigcirc\bigcirc$
低周波	LS1	$p=0.289$	$e=0.62$	+
	LS2	$p=0.526$	$e=0.64$	+
	LS3	$p=1.049$	$e=0.62$	+
	LS4	$p=2.052$	$e=0.59$	+

豊浦砂 (空気乾燥)				記号
共振法	RD1	$p=0.25, 0.5, 1.0, 4.0$	$e=0.67$	$\square\square\square$
	RD2		$e=0.68$	$\triangle\triangle\triangle$
	RD3		$e=0.69$	$\bigcirc\bigcirc\bigcirc$
低周波	LD1	$p=0.290$	$e=0.67$	+
	LD2	$p=0.540$	$e=0.70$	+
	LD3	$p=1.085$	$e=0.68$	+
	LD4	$p=1.050$	$e=0.71$	x
	LD5	$p=2.060$	$e=0.67$	+

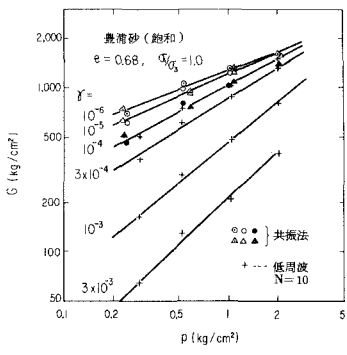


図-6. G と p の関係 (飽和)

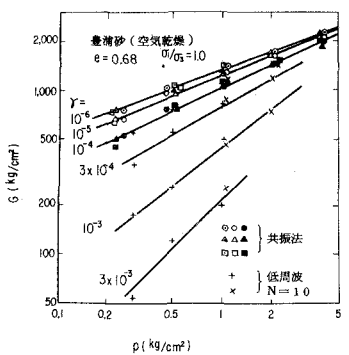


図-7. G と p の関係 (空気乾燥)

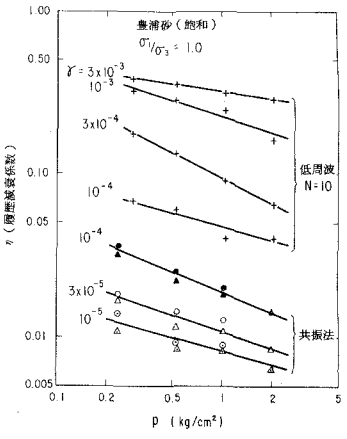


図-8. η と p の関係 (飽和)

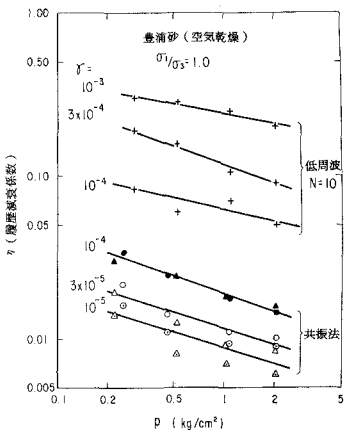


図-9. η と p の関係 (空気乾燥)

えし回数の違いなどと考えられる。図-10に、 N 或 η の値に及ぼす影響を示す試、 G の場合とは異なり $\gamma=10^{-4}$ 付近でも N の増加による η の減少は無視できないことである。従って $N \sim 2000 \sim 4000$ に対する η は、 $N=10$ における η よりむしろ小さくなる可能性があり、 N を一致させて両試験の η の値と比較すれば必ず一致する可能性がある。現在の段階では、両試験による η の差は解明できないが、少なくとも $\gamma=10^{-4}$ 付近でも η の値はくりかえし回数の影響を無視できないことは確かである。更に、 G の場合と異なり、 γ が大きくなるとくりかえし載荷の η に及ぼす影響は逆に小さくなっていくことは注目すべきである。

ここで、 γ の値が G 及び η の値に及ぼす影響を若干考察してみよう。図-11に、図-6.7における $G \sim p$ 直線の勾配 m が γ の増加によって増加していくことを示す。 $\gamma \sim 10^6$ では m は約 0.38 であるが $\gamma=5 \times 10^3$ 付近で m は 1 の値になっている。このことは、 γ の増加に対する G の減少率は p より小さいほどになることを意味している。例えば、図-6で $p=0.2 \text{ kg/cm}^2$ で、 γ が 10^6 から 3×10^3 に増加すると G の値は約 700 kg/cm^2 から 50 kg/cm^2 と $1/4$ に減少しているが、 $p=2 \text{ kg/cm}^2$ では約 1650 kg/cm^2 から 400 kg/cm^2 へと約 $1/4$ にしか減少していない。一方、減衰は図-8.9に示すように同じ歪レベルに対して拘束圧が小さい程大きい。又、 γ が大きくなると p の大きさによる η の値の差は大きくなってゆく。このことは、減衰の値についても拘束圧の影響は決して無視できないことを示している。

9 結論

- (1). 新たに開発した中空炭試体を用いた低周波動的セン断試験機により、セン断歪 $\gamma=5 \times 10^{-5}$ から 10^{-2} までの G と減衰の値を求めることできる。
- (2). 豊浦砂の G の値は、 $\gamma=10^{-4}$ 付近で測定原理、歪速度（周波数）、くりかえし回数の大きな違いにもかかわらず共振土質試験と低周波動的セン断試験による値はよく一致した。又、両試験において、 G の値は飽和、乾燥による差はなかった。
- (3). 豊浦砂の減衰 η の値は飽和、乾燥による差はないが、両試験による値は、 $\gamma=10^{-4}$ 付近で差が大きかった。
- (4). γ の増加による G の減少率と、 γ の増加による η の増加には、拘束圧 p が大きく影響を持つ。

今後は、他の砂、土について、引き続き実験を継続していくつもりである。尚、本研究を進めるにあたって振動研究室長岩崎敏男氏の御指導をいただいた。末筆ながら感謝の意を表します。

9 参考文献

- 文献1 土木研究所資料、第912号、土の動的変形特性—共振土質試験機による測定—昭和49年5月、建設省土木研究所振動研究室
- 文献2 岩崎敏男(1975.11) 土の動的性質の現場測定と室内実験、第4回日本地震工学シンポジウム

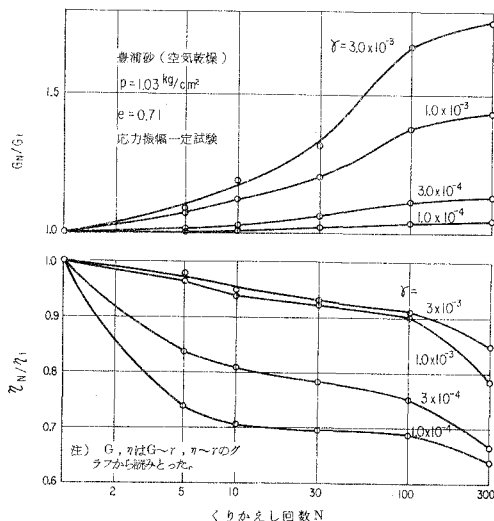


図-10 くりかえし回数の G と η に及ぼす影響

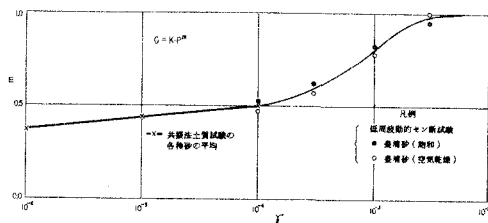


図-11 γ の $G \sim p$ 関係に及ぼす影響