

III-52 土の動的せん断弾性係数について

京都大学防災研究所 正員 柴田 徹
同 正員 石黒良夫

1. 研究の目的

土の動的せん断弾性係数 G に関しては、これまでに種々の材料を対象に、各種の試験法によって数多くの測定がなされてきている。それらデータの中から比較的広範囲に動的ひずみ γ を変化せしめたものを選び、微小ひずみ ($< 10^5$) における動的せん断弾性係数を G_0 としたとき、 G/G_0 と γ の関係をプロットすると図-1がえられる。この図は与えたひずみの大きさによる G の低下割合を示すものであり、粘土も砂も含まれているが、土の種類（あるいは試験法？）によって傾向はかなり異なっている。この報告の目的は、図-1の関係を統一的に表現しようと試みることであり、さらに G に関する測定結果より若干の考察を行なうことである。

なお煩雑を避けるために、図中のプロット等にも引用の著者名は省略し、文献番号の記入で代用させていただいたことを予めお断わりしておきたい。

2. 動的応力～ひずみ関係

せん断応力であるひずみを土供試体に対して動的に繰り返し載荷すると、図-2に模式的に描くような履歴ループがえられる。ここで対象とする G は、実線で描いた履歴ループの上下端を結ぶ直線の傾斜に相当し、等価弾性係数といわれるものである。いま履歴ループの upper 端を連ねると図中の実線で示す曲線がえられるので、これも仮りに動的応力～ひずみ曲線とよぶことにした。

動的 $\tau \sim \gamma$ 曲線の形についてはいろいろの扱いができてよいが、応力～ひずみ関係を両対数表示すれば降伏値を求められることが、以前のレオロジー的考察から判明しているので、それを適用して

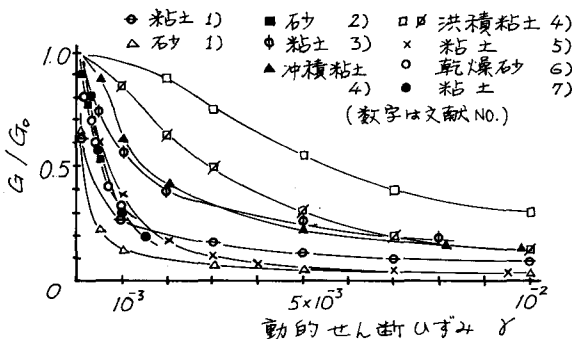


図-1

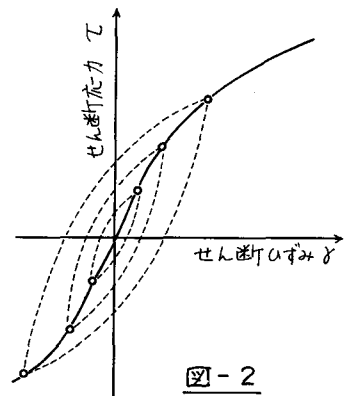


図-2

両対数紙上にプロットしてみる。その典型例は図-3(A)に示すようであり、2本以上の折線から構成されるとみなせるものが多い。この図は Jordan Buff clay について、一軸圧縮試体に軸方向変位を動的に与えた結果を整理したもので、縦軸は τ とせん断強度 $S_u = \sigma_{1, \max} / 2$ で割った値で表わしている。

直線の立ち上りは 45° の傾斜をもち、 σ_1 の折角に相当する降伏応力、ひずみそれぞれ τ_0 とする。図-3(A)の τ , σ をこれら τ_0 , σ_0 で割ると図-3(B)となり、これがモデル表示した土の動的応力⁷⁾ひずみ曲線である。なお降伏点 τ_0 を過ぎてから後の直線の傾斜は、土の種類によって変化するので、図では2本の直線 OA, OB に囲まれる範囲で表わしている。

3. 動的せん断弾性係数とひずみ

あるひずみに対する動的せん断弾性係数 G と、微小ひずみに対する G_0 との比 G/G_0 は、 $G/G_0 = (\tau/\tau_0)(\sigma_0/\sigma)$ と表わされ、しかも τ/τ_0 と σ_0/σ の関係は図-3(B)のようにモデル表示したので、 $G/G_0 \sim \sigma/\sigma_0$ 。あるいは $G/G_0 \sim \tau/\tau_0$ の関係も容易に導くことができる。

その際、応力・ひずみのいずれに着目してもよいが、従来から、 G は応力レベルよりもひずみの大きさによる変化を問題にすることが多かったので、ここでもひずみ依存性を考え、 $G/G_0 \sim \sigma/\sigma_0$ 関係を描くと図-4となる。すなわち $(\sigma/\sigma_0) \leq 1$ では $(G/G_0) = 1$ 、 $(\sigma/\sigma_0) > 1$ では両対数紙上で右下りの直線となり、その直線の傾斜は、図-3(B)の σ_1 折角以上の直線のそれを α とすれば、 $-(1-\alpha)$ で与えられる。

さて図-1に示した各種の土について、降伏点ひずみ σ_0 を求めるためには、動的 $\tau \sim \sigma$ 曲線(両対数プロット)を描き、 σ_1 折角を見出すとよいが、 G を算定する基礎となる応力とひずみに関する資料が入り困難なものが多く、その場合にはわざわざ $\log(G/G_0) \sim \log \sigma$ 曲線の急曲点より近似的に σ_0 を求めることとした。その結果、図-1に引用した土では、 σ_0 の値は砂質土; $0.9 \sim 2.0 \times 10^4$ 、粘性土; $2.0 \sim 7.0 \times 10^4$ で、いずれもひずみのオーダーは 10^{-4} であるが、粘性土の方が大きいのが特徴である。

それぞれの土の σ_0 を用い、 σ/σ_0 と G/G_0 の関係を一括して示すと図-5中の実線曲線群がえられる。図中に斜線で囲んだ範囲は、大岡・吉見の成果⁸⁾を記入したものであり、これは Seed-Idriss の曲線¹⁾と同様、 $G_0 = 1.100 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_0 = 1.0 \times 10^4$ として図上におけるその位置を求めた。

図-5をみると、曲線群の形は土の種類にかかわらず図-4のモデルとよく似ていっているので、このよ¹⁾うな表示法が今後土の動的問題を扱う上で何らかの手掛りを与えてくれるのではないかと期待している。なお $\sigma/\sigma_0 = 1.0$ を通る2本の直線(実線)は、図-4あるいは図-3(B)の OA, OB に対応するものであり、変動範囲をおさめたこれら2本の直線より、実験式として

$$(G/G_0) = (\sigma/\sigma_0)^{-(0.75 \pm 0.1)}$$

がえられる。

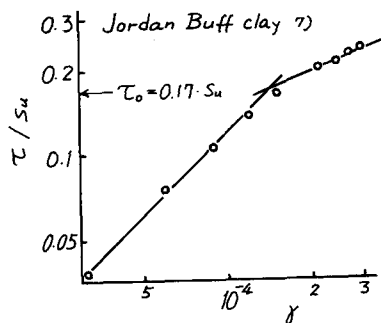


図-3(a)

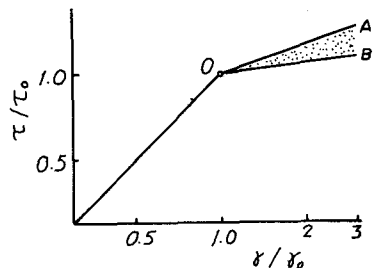


図-3(b)

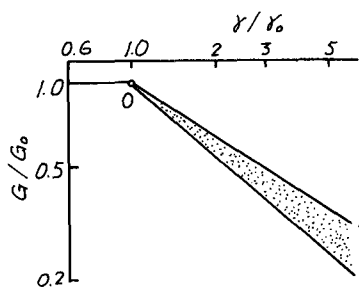


図-4

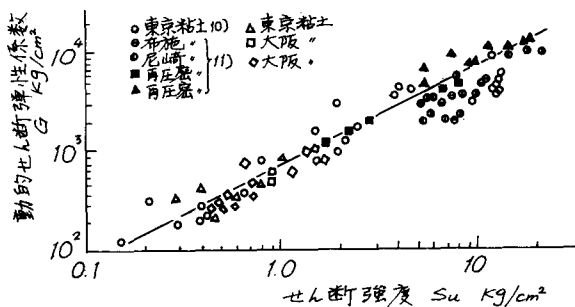


図-6

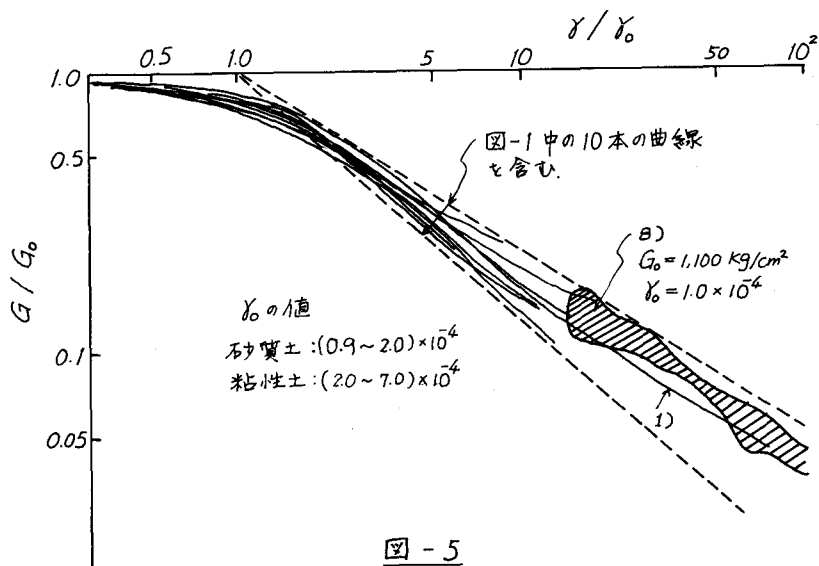


図-5

4. 動的せん断弾性係数の測定

前述図-5の図解を実際に適用しようとするれば、降伏変ひずみ ϵ_0 とともに微小ひずみでの G_0 を知る必要がある。

砂については、これが同じより比平均主応力の関数として表わされることが報告されているが、筆者らの三軸・伸張状態にある砂試体について測定した結果⁹⁾では、 G は平均主応力よりも、動的せん断応力を加える面に作用する垂直応力が支配的であった。

粘土に関する実験は超音波パルス法を用いて、S波速度から G を求める方法によった。これによれば、共振周波数が25Kcと高く、変ひずみも非常に小さいので、おそらく G の値としては最高に近い（すなわち G_0 ）ものがえられるのではないと思われる。

図-6には6種類の粘土についての結果が、 G とせん断強度 S_u との関係としてプロットされている。図中、黒塗りの記号は締め直し再圧密粘土を示し、再圧密粘土と、 S_u の低い粘土でない粘土では $G \sim S_u$ 関係にみられる英のばらつきは比較的小さい。一方、 S_u の大きい粘土でない粘土では一軸強度がやや低く測定されているのではないかと思ふ。結局、図-6によれば粘土の G_0/S_u の値としては、700程度と考えられる。

引用文献

- 1) Seed, H.B. and I.M. Idriss: Influence of soil conditions on ground motions during earthquake, Proc. ASCE, Vol. 95, SM 1, 1969, 99-137.
- 2) Drenvich, V.P., J.R. Hall and F.E. Richart: Effect of amplitude of vibration on the shear modulus of sand, Proc. Int. Symp. Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, 1967, 189-199.
- 3) 中崎英彦: 動態時の粘土の力学的性について, 京都大学修士論文, 昭. 41.
- 4) 竹中津之介, 西垣好彦: 大阪地盤の応力と変形の関係について, 大阪府防災計画調査報告書, 昭. 46, 46-68.
- 5) Krizek, R.J. and A.G. Franklin: Nonlinear dynamic response of soft clay, ASTM, STP 450, 1969, 96-129.
- 6) Hardin, B.O. and W.L. Black: Vibration modulus of normally consolidated clay, Proc. ASCE, vol. 95, SM 6, 1969, 1531-1537.
- 7) Kondner, R.L. and R.J. Krizek: A rheological investigation on the dynamic response spectra of soils, Report of The T. I. of Northwestern Univ., 1962.
- 8) 大岡弘, 吉見吉昭: 砂のせん断弾性係数について, 第6回土質工学研究発表会, 昭. 46, 245-248.
- 9) 柴田 徹次, 石黒良太, 塩田寛作: 土中伝播する弾性波速度に関する考察, 土学会関西支部青年大会, 昭. 46.
- 10) 嶋 悦三, 工藤一嘉: 地震時に於ける地盤の挙動について, 第6回災害科学シンポジウム, 1969, 67-70.
- 11) 八木則男, 石井義明: 土または岩石における超音波伝播速度と力学的性, 京大防災研年報, 12号, 昭. 44, 77-88.