

地震時の土の動的特性

市原 松平*

土に与えるせん断速度が早くなると、遅い場合よりも土の非排水強さが大きくなることは、1848年にフランス人 A. Collen によって実験されている。その後、このようなせん断速度を早めたときの土の強さを求める研究は平和あるいは軍事目的から、かなり多く行われた。A. Casagrande (1948年)のパナマ運河の拡幅工事に関連して行ったこの方面の研究は有名である¹⁾。

このように、土の動的特性を求める実験は、その必要性に応じて生じたのである。昭和39年6月の新潟地震を契機として、地震の作用を受ける土の動的性質を求めることの重要性が再認識された。この動的性質とは、地震時における土の変形特性である。地震時に震源から、いま考えている地盤の真下の硬い基盤に地震波が到達する。この波が次第に上層に伝達されて、上層の地盤と地中、地上の構造物をゆするが、この場合の地盤や構造物の挙動に、土の変形特性が大きく関与するのである。

地震時に、土は複雑な挙動を示し、破壊に至る場合と破壊しない場合がある。しかしながら、地震時における土の動的問題は、しいて分ければ、変形と破壊の問題に大別される。前者は地盤や構造物の振動の問題であり、後者は地盤破壊や構造物の崩壊の問題である。ここでは前者の問題を最初に述べ、後者については液化化について述べる。

地震時に、土の要素は、周期的に交互に向きを変えて作用する、せん断応力によって変形を起こすと考えられる。この場合の変形特性は、剛性率 G と減衰定数 h で代表させられ、一質点系で表現した場合の次の振動方程式の2つの係数 K と C は、それぞれ G と h で求めることができる。

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -m\ddot{u}_b \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 u は質点の基盤に対する相対変位量、 \ddot{u}_b は基盤に作用する地震時の加速度、 C は減衰係数、 K はばね定数と称し、質点の単位変位量に対するばねの復元力である。

土は理想的な完全弾性体ではない。それゆえ、土に加えられたエネルギーの一部は、熱エネルギーとなって転換され、再びこれを力学的エネルギーとして活用できない。したがって、上述の C は単なる粘性減衰係数ではな

く、また、 C の値を決定する h には、粘性減衰と履歴減衰が含まれる。土の場合には、後者の履歴減衰の方が前者よりもかなり大きいので、大きなひずみの場合に、 h は20%にも達する。

G と h の値を支配する因子は、ひずみの大きさ、応力の繰返し回数、土に作用する有効拘束圧、応力履歴、および土の間げき比などである。このために、ひずみレベル、拘束圧、繰返し回数などを考慮して、試験法を決定しなければならない。繰返し回数は、地震の場合には $N=100$ 回までである。

ひずみについて考えると、 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ のオーダーでは土は弾性的性質をもち、この範囲のひずみ振幅をもった振動は、原位置の弾性波探査、室内における波の伝播速度の計測、中実式円柱共振試験²⁾から G と h の両特性を求めることができる。また、ひずみが $10^{-4} \sim 10^{-2}$ の範囲では土は弾塑性の性質をもち、この範囲のひずみ振幅をもった振動は、原位置の振動実験や実験室の中実式円柱共振試験³⁾、または、繰返し応力を試料に与える単純せん断試験³⁾で求めることができる。なお、大地震の際における土のせん断ひずみは、 $2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ とされている。最近、Covacs は、ひずみの大きさを変えするために、自由振動、強制振動を成型粘土に与え、さらに大きなひずみに対しては、単純せん断試験を行って、 G と h を求めた³⁾。その結果、ひずみに対応する $G/(非排水強さ)$ は、1つの曲線上に図示されることがわかった。各ひずみに対応する G と h の値は、たくさんの研究者の実測値に基づき、砂と粘土に分けて、Seed によってまとめられている²⁾。また、砂について、種々の平均有効拘束圧 σ_m (t/m²) と間げき比 e に対応する G の値 (t/m²) を求めるための実験式が Richart によって提案されている²⁾。すなわち、粗砂について示せば次式となる。

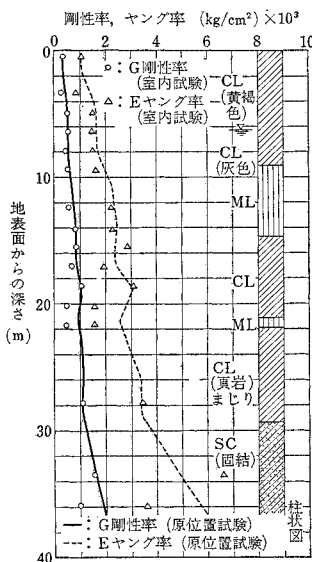
$$G = \frac{1032(2.97-e)^2}{1+e} (\sigma_m)^{0.5} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、ひとつ最近の話題を述べよう。筆者は昨年、土質工学会のライブラリーの1巻²⁾を編集しているときに、土の動的性質に関して、ひとつの疑問をもった。それは、小さなテストピースによる実験値が地盤の動的性質を表現できるかということである。この疑問に対して

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土圧研究施設

最近 Cunny らの研究は興味深い結果を示している⁴⁾。彼らは、アメリカ合衆国内の14か所で、WES と他の2つの研究機関が同じ方法で行った原位置振動実験と、また、その地点から採取した不攪乱試料（または成型試料）について行った共振円柱試験のそれぞれによって得られた剛性率 G とヤング率 E の比較を行った。共振円柱試験を用いた理由は、野外の振動実験と同じひずみ量を与えるためだと考えられる。

原位置の振動実験では、地盤上に起振機をおき、これで地盤に上下方向の定常振動を与え、地表面を伝播してゆくレイレイ波の波長 λ を計測する。 $v = \lambda f$ から速度 v を求める。振動数 f を変えれば、 v も λ も変わってくる。このレイレイ波の速度は、地盤中を伝わる横波の速度に近似的に等しいとする。差は9%程度である⁵⁾。これから求めた G と E は波長の1/2の深さの位置におけるそれぞれの値と仮定する。このようにして、地盤の各深さの位置における G と E は比較的容易に決定されよう。原位置試験、室内試験のそれぞれから得られた値の比較の一例は、図-1 に示されているが、この例では、地表面下 18 m



(R.W. Cunny, December, 1973, ASCEによる)

図-1 剛性率、ヤング率の原位置試験値と室内試験値の比較

まで両者の値はよく合っている。これ以外の実験値を含めて、Cunny らは次のように結論している。① 両者の差は±50%で、どちらが大きいということはいえない、② 室内実験では、拘束圧と間げき比を野外と同じようにすることが難しいので、原位置試験の方が正しい、③ 礫まじり粘土では、供試体の作成が難しいために、原位置と室内の両実験値の差は大になる。

次に、飽和砂の液状化について述べる。液状化というのは間げき水圧が増大して、土がせん断強さを失う現象である。新潟地震で確認された現象であるといっても、かなり以前から液状化が生じたという記録はある⁶⁾。また、1968年5月16日の十勝沖地震でも、この現象によ

って、大きな被害がひきおこされた。

液状化に影響を与える因子は大体わかってきた。まず地震時に地盤の各点に発生するせん断応力の大きさと、その繰返し回数である。これらは、考えている地震の震央距離とマグニチュードに関係をもっている。次に、上記のせん断応力を受ける地盤の種類と土の粒径、粒度、土の受けている有効拘束圧、地下水面の高さ、ならびに土の相対密度である。液状化されやすい土の粒径、粒度については、これまで研究者によってかなり異なった報告がされているが、一般的にいうと、よく粒の揃った細砂や中砂である。平均粒径でいうと、0.02~0.5 mm である。

地震時に、いま考えている地盤が液状化するかどうかを検討することが重要である。この検討には、過去の例に基づく方法、Seed らの応答解析による方法などが代表的であるが、最近 Seed らによって提案された簡便法⁷⁾は、液状化を予測するためのある程度の目安を与えてくれる。これは数多い資料に基づき、さらに野外での既往の発生を考慮して決定されたものである。

アースダムのような堤体で発生する地震時のせん断応力、または地表面が水平であっても、地盤の構成が複雑な場合の地震時のせん断応力の算定は、有限要素法によらなくてはならないであろう。いずれの計算においても計算法に仮定が含まれるから、計算値と観測した挙動との比較が強く要望される。

最近、都市の防災的見地から、液状化の調査が各都市で行われている⁷⁾。地盤は液状化の判定に対して、新潟のような単純な砂地盤ではなく、砂や粘土が互層を呈している。そのような地盤で下層の液状化が上層に対してどのような影響を与えるかなど⁸⁾、まだ不明点が数多く残され、今後の研究にまたれる。

参考文献

- 1) 最上武雄編著：土質力学，pp. 675~696，技報堂。
- 2) 市原松平：第2章，応答解析に必要な土の動的変形特性，pp. 7~42，土と構造物の動的相互作用，土質工学会。
- 3) 市原松平：土の動的性質，土木学会誌，第57巻，第4号，pp. 19~29，昭和47年増刊号。
- 4) Cunny R.W., and Z.B. Fry: Vibratory in Situ and Laboratory Soil Moduli Compared, Proc. of ASCE, Vol. 99, No. SM 12, pp. 1055~1076, December, 1973.
- 5) 嶋悦三：6.3 弾性波試験，pp. 516~533，土と構造物の動的相互作用，土質工学会。
- 6) 吉見吉昭：5.3 液状化，pp. 452~470，土と構造物の動的相互作用，土質工学会。
- 7) 石原研而：地盤の液状化調査について，土と基礎，Vol. 21, No. 6, pp. 21~22，昭和48年6月。
- 8) 岸田英明：飽和砂質土の液状化による被害例と対策，第16回土質工学シンポジウム論文集，pp. 55~62，昭和46年10月。