

土の動的性質——耐震設計のための土の動的強度

名古屋大学工学部 正員 市原 松平

日本において土の動的性質は新潟地震以来特に関心をもたれるようになった。地震のない諸外国においても活発な研究活動が行なわれているのは次の理由によるものである。

すなわち、(1)最近、機械基礎の設計に重要性を増したため、(2)工事の施工に振動締固めや振動くい打ち機等が普及し、それらの施工効率を増進するため、(3)爆装、その他くい打ち作業などによる施工中の振動や衝撃が問題になったため、(4)交通機関の速度や重量が増大し、かつまた交通量が急増したために、振動の作用にもうする道路を造ること、そして、一方では、(3)と同じように振動公害が問題になってきたためである。要するに、関心をもたれる土の動的性質は、自然地震の作用に対する土の性質と、人工的な振動・衝撃に対する土の性質である。ここでは土の動的性質のうち土の強度を、特にわれわれにとってもっとも身近な問題である耐震設計において、どのような方法で求め、それをどのように適用していくかの2点についてみる。

1. 土の動的強度試験法の分類とその原理

表-1は動的試験法の分類を示したものである。
耐震設計に使う土の

この試験法は大別して二つに分けられる。その一つは振動台上で行なう直接せん断試験、他は土の試料にパルス荷重を与える三軸試験である。ここでは後者の場合から先にのべる。この試験には応力制御試験とひずみ制御試験とがある。応力制御試験はSeedによって開発されたもので、土の疲労強度を求めるのに適している。地震時における土の強度を求める場合には非排水試験を行なうのが妥当である。これは砂の場合にもいい得る。応力制御の試験は一定の側圧のもとで、軸方向にあ

分類	名称	力の加え方	求めたいもの	適用される土
1	振動中土の試料にひずみを与える試験(振動台上で行なうせん断試験)	ひずみ制御 応力制御	C, φ	砂 粘性土
2	土の試料にパルス荷重を与える試験	応力制御 ひずみ制御	応力パルス数 N とひずみ 圧縮強度 ならびに C, φ	砂 粘性土 粘性土

表 - 1

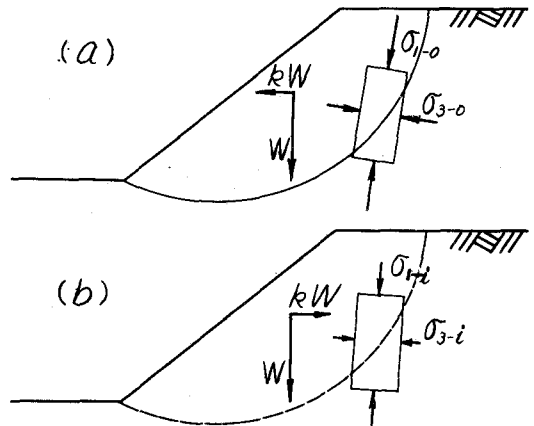


図 - 1

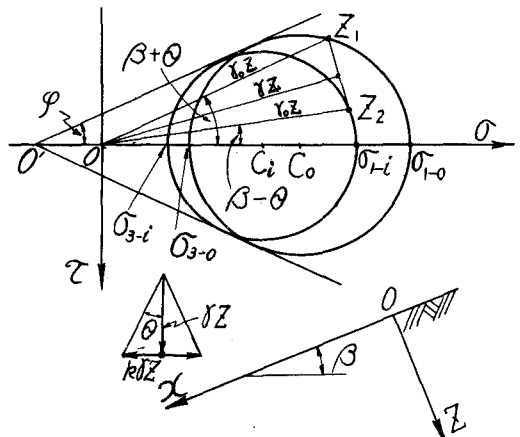


図 - 2

る一定のパルス応力を与えたときに、各パルス数に応じた試料のひずみを求める試験である。普通、地震時において、土の要素が受けるパルス応力の回数 N は 30 回程度である。地震時に模擬して、なによりこのような方法の実験を行なうが、その原理は次のように説明される。図-1(a)は水平地震力 R_W が斜面の外側に向って作用し、 R の絶対値が最大となった瞬間、図-1(b)は地震力が斜面の内側に向って作用し、 R が同じく最大値をとった瞬間である。両場合における最大主応力と σ_{1-0} と σ_{1-i} 、最小主応力と σ_{3-0} と σ_{3-i} であるとし、また、土の内部摩擦角 ϕ は最大加速度のみによって決定され、地震動の1サイクル全部において土は破壊の状態にあつて、そのときの ϕ は一定であると仮定すると図-2のMohrの円から4つの主応力は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1-i} < \sigma_1 < \sigma_{1-0} \\ \sigma_{3-i} < \sigma_3 < \sigma_{3-0} \end{aligned} \right\} \text{---(1)}$$

となる。ここに、 σ_1, σ_3 は $R=0$ に相当する場合の主応力である。すなわち、地震時には主応力の大きさ、方向ともに R の変化に応じて変化する。地震力が斜面の外側に向いた場合は最大、最小主応力がともに大きく、斜面の内側に向いたときはこの逆になる。また、一般に地震動の1サイクル中において、図-1のすべり面上に作用しているせん断応力は一方向のみに作用し、大きさのみが交互に変化するいわゆる非対称せん断応力が發揮される。この応力状態を実験室の三軸圧縮試験で再現するには、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma_{1-0} - \sigma_{1-i}) \\ \Delta\sigma_3 &= \frac{1}{2}(\sigma_{3-0} - \sigma_{3-i}) \end{aligned} \right\} \text{---(2)}$$

として、図-3(a)(b)に示す加圧、減圧の周期的応力を土の試料に与えればよい。しかしながら飽和土の場合に、土の有効応力が変形に関しては、図-4右辺第一項の実験、すなわち側圧を一定にして、軸方向にパルス応力 $\pm\Delta\sigma$ を与える実験を行なえばよい。ここに重要なことは上述した非対称性

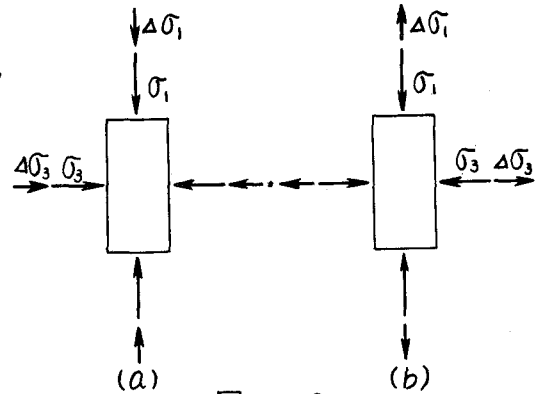


図-3

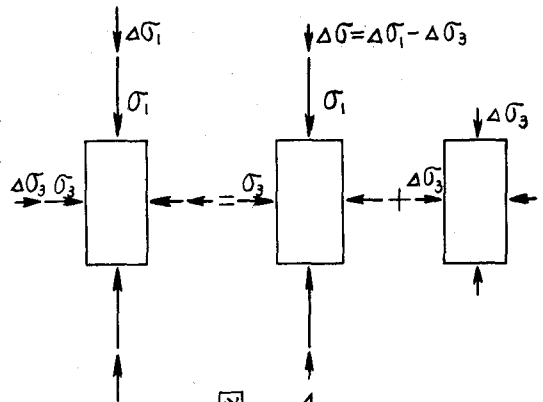


図-4

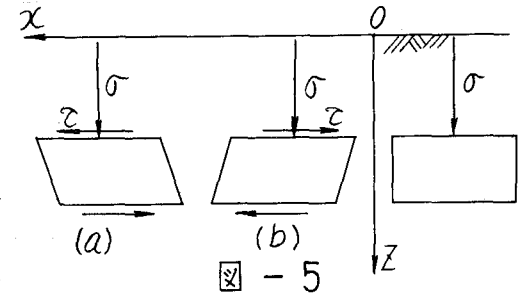


図-5

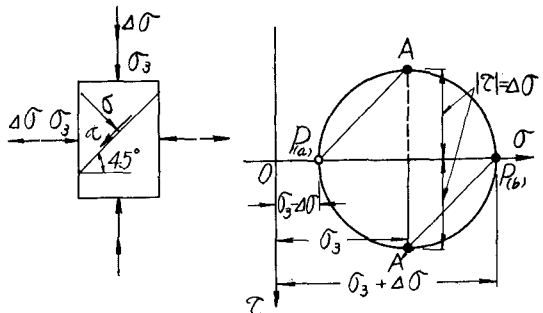


図-6

ん断応力を発生させるために、

$$40^\circ < \sigma_1 - \sigma_3 \text{-----}(3)$$

でなければならぬ。

図-5、図-6は同じくSeedが行なった新潟地震における液状化の発生の可能性を検討することと目的とした実験の原理説明図である。これは上述の載荷法とことなり、対称せん断応力を発生させていることに注意を要する。図-7はひずみ制御動的三軸圧縮試験機、図-8は分類-1に属する動的直接せん断試験機の説明図である。

2 試験結果の適用

液状化の場合ではなくて、斜面安定の場合の適用についてのべよう。Seedは耐震設計への実用化をねらって次のように考えた。地震時に、土の要素はある常時応力 (Sustained stress) が作用している状態に、さらに周期的パルス応力を付加的に受けて破壊をおこすか、または大きな変形をおこす (図-9参照)。いま、常時応力とパルス応力 (40°) の各々を土の正規強度の百分率であらわし、 $N=30$ で試料にあるひずみを与えたとときの両応力の組み合わせを図示すると、ある成型粘土については図-10のような関係であらわすことができる。この実験結果よりわかるように、常時応力が正規強度の50%~80%では、同一ひずみをおこすための (常時応力+パルス応力) / (正規強度) の値は常時応力が変化しても一定値に近い値をとっている。いま、常時応力とパルス応力の合計を $N=30$ に対する各ひずみ量を横軸にとり、成型した粘土質砂の場合の一例を示すと、図-11のようになる。またこの図に同じ試料に対して同じ側圧 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ で行なった場合の普通の三軸圧縮試験 (静的試験) による値が示されている。図-11のような表現法を用いると、あるパルス応力を作用させたときに、パルス数からちょうど $N=30$ であるときのひずみと (常時応力+動的応力) との関係がわかる。これをいいかえると、地震時に土のひず

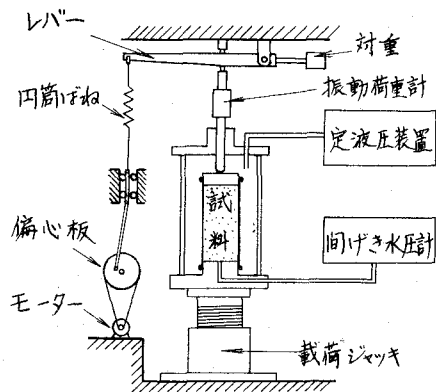


図-7

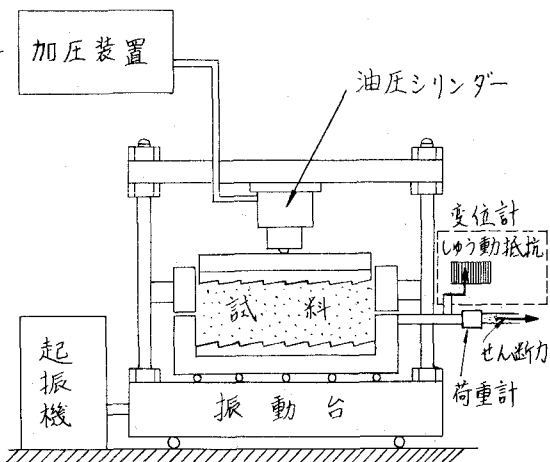


図-8

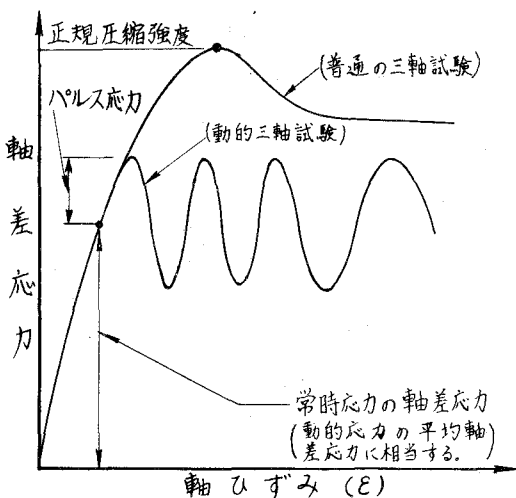


図-9

みを規定した場合、その土に対してどれだけのせん断抵抗が期待できるかということがわかる。

上の実験法は堤防または、その他の土構造物の建造中または建造直後に、土が十分に圧密されていない状態に適用できる。その場合上記の静的応力は側圧 σ_3 の2倍程度とかければよいであろう。

構造物が建造後完全に圧密された場合には、上記の常時応力で圧密した試料に対し、あるひずみをおこせる動的時の最大軸差応力を求めればよいことになる。このためにはまず、

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma_3} = K = 2 \quad \text{----- (4)}$$

と置き、 σ'_1 を与えて σ_3 を決定する。このようにして試料を非等方圧密してから、パルス応力 $\pm 10\sigma_3$ を与えることになる。たとえば、 $N=30$ 、 $f=2\text{ cps}$ として、 $10\sigma_3$ を変化させ、動的時の最大軸差応力 $\sigma'_1 + 10\sigma_3$ に対するひずみを求め、設計で定められたひずみに対する最大軸差応力をとって、これが正規圧縮強度の何倍であるかを求めればよい。

ひずみを規定したときの動的圧縮強度の正規圧縮強度に対する比がわかると、すべりに対する安定計算は次のようにして行なう。

まず、すべり土塊の重心に慣性力(RW)を水平に作用させて、正規圧縮強度から決定される C 、 ϕ を用いて、臨界面を求める。次に、すべりに対する安全率 F' を求める。実際はこのすべり面にはそのひずみに対応する動的せん断応力が作用するから、地震時の安全率 F は次式で求める。

$$F = F' \times \frac{\text{動的圧縮強度}}{\text{正規圧縮強度}} \quad \text{----- (5)}$$

このことは地震時に動的せん断強度が C_1 、 ϕ_1 に変化しても、静的の C 、 ϕ から決定した臨界面は変化しないという仮定に基づいている。実際では、地震時にあるすべり面に沿ってすべりが生ずる場合、そのすべり面には動的時の C_1 、 ϕ_1 が存在するはずである。しかしながら C_1 、 ϕ_1 の信頼できる値はいまだえられていないので、現在では上記の仮定による簡便法を使用している。

