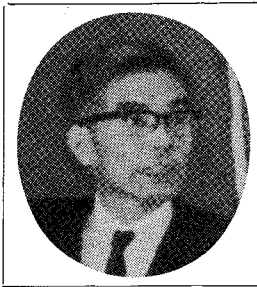


土の動的性質

—耐震設計のための土の動的強度—

市原 松 平*



<講演する市原氏>

1. まえがき

土の動的性質というのは、土が動的な作用（応力またはひずみ）を受けたときの性質をいう。そのうち筆者は耐震設計に必要な土の動的強度について述べる。

広く一般に動的強度というとき、かなり歴史が古いものがある。いまより 130 年前 A. Collin という人が実験を行ない、衝撃による粘土の瞬間的な強度は普通の強度の 2~3 倍に達するということを発見している。当時この強度については何等重要性が認められていなかったが、いまでは衝撃による強度はある方面で熱心に研究されている。

丁度いまより 30 年前になって、Casagrande と Shannon が、真空三軸圧縮試験機を用いて、破壊までの載荷速度を変えた場合の強度を求めている。これは恐らく弱拘束圧での実験（たとえば地表面を対象とする実験）が必要であったものと考えられる。

以上は衝撃に対する強度であるから、土の試料に与えるパルス応力の回数は 1 回であるが、道路の路床、路盤に関する研究では、路床、路盤が非常に多くの繰り返し荷重を受けるという考えのもとに、試料に 1 万回以上のパルス応力を与えて、応力と変形の関係や、強度をみる実験が行なわれている。いま、これから述べる耐震設計に必要な強度を求める実験では、上述したパルス応力の回数とはことになって、普通振動数が 1~2 cps の応力を 10~30 回与えている。これは、アメリカにおける強震計の記録から、有効パルス数を求めて決定したものである。なお耐震設計を対象とした実験では、砂、粘土を問わず非排水実験を行なうのが妥当である。

2. 地震時における土構造物、基礎地盤の破壊の分類と破壊の原因

地震時における土の破壊は表-1 の 1, 2 に示すせん

表-1 地震時における土構造物、基礎地盤の破壊の分類と破壊の原因

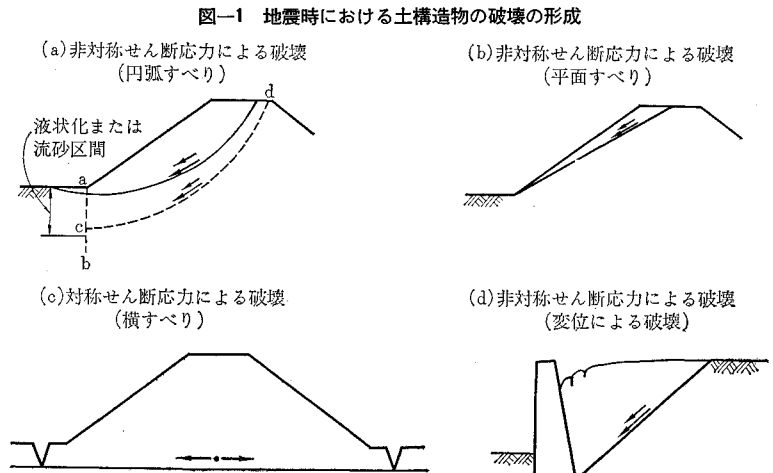
破壊の分類	破壊の原因
1. 非対称せん断応力による破壊	(1) 攪乱力による { 疲労による (粘性土) ・粒子のかみ合せのゆるみによる (砂)
2. 対称せん断応力による破壊	(2) 間げき水圧の上昇による (3) 変位による

断破壊に分類される。すなわち、破壊時にすべり面に発生するせん断応力の向きと大きさによって、非対称せん断応力による破壊と対称せん断応力による破壊に分類される。またこの破壊を起こす原因を考えると、地震時に粘性土ではかく乱力の作用によって、粒子間の結合が次第に疲労して破壊する。砂の場合にはかく乱力による破壊は疲労よりは、むしろ粒子間のかみ合せのゆるみによって起こるものである。しかしながら、飽和土では破壊は間げき水圧の上昇によって起こることは決定的である。以上の 2 つの原因のほかに、たとえば擁壁の裏込め土などのように、擁壁が地震時に突然変位して、それが 2 次的な原因となって裏込め土に破壊を引き起こす場合がある。これに対する設計的立場からの考察は、現在のところ一番むずかしいようである。なんとなれば、裏込め土に対して、破壊に要するせん断応力を耐震的立場から決定しても、擁壁ならびにその基礎が弱体であれば、基礎の破壊と同時に擁壁が変位して、裏込め土が破壊してしまうためである。擁壁や土構造物の設計では、その基礎は本体である壁体、裏込め土、堤体と同じような重要性をもって、耐震的に設計しなければならぬ理由がここに存在する。

図-1 はアースダムと擁壁を例にとって、その破壊を

*正会員 工博 名古屋大学教授, 工学部土木工学科

説明したものである。図-1 のうち (c) 図を除く (a) (b) (d) 図は非対称せん断応力による破壊で、すべり面より上に2つのせん断応力の大きさが示されているが、これは周期的応力が作用して破壊を起こすときに、すべり土塊からその下部にある土体に作用するせん断応力の向きと大きさを示したものである。地震時に、せん断応力はここに示した両極端の大きさの間の値を周期的に変化しながら作用することを示したものである。図-1 の (a), (b), (c) の各場合におけるすべりの名称はカッコ内に示されている。



(c) 図の対称せん断応力によるすべりはアラスカ地震でその例があった。また (a) 図で堤体の斜面先で液状化または流砂現象が発生すると、斜面先 a 点を通る鉛直面の左側の深さ ab 区間で有効応力が 0 になるから、この区間での基礎の砂は変形に対して少しの抵抗もたなくなる。したがって上述の液状化または流砂現象中に、円弧 dc に沿って堤体はせん断破壊を容易に引き起こすことになる。これも変位が原因したせん断破壊ということになる。

3. 動的強度の試験法

上述の地震時における土の動的強度を求めるために、普通三軸圧縮試験機による応力制御試験が行なわれる。

この試験は一定の大きさのパルス応力がある回数 N だけ与えて、ひずみを求める試験である。このような実験を同一試料に対して沢山行なうと、ある N の値に対して、ある軸ひずみ ϵ を与えるときのパルス応力の大きさ σ_0 を逆に求めることができる。この実験の原理、すなわち、まず非対称せん断応力で試料をせん断する実験の原理は 図-2 から 図-6 までに示されているから、この原理についてさきに述べよう。

図-2(a) は地震力 kW が斜面の外側に向かって水平に作用した場合、図-2 (b) は内側に向かって水平に作用した場合で、(b) 図の点線は (a) 図のすべり面をそのまま示しただけであって、地震力が斜面の内側に向かって最大加速度になった瞬間のすべり面を意味していない。

地震による周期的応力の作用回数が増すにしたがって、(a) 図のすべり面上の土の要素は (b) 図の場合でも破壊状態になると考えられる。もしも (a), (b) 両図の状態で内部摩擦角 ϕ が変わらないとすれば、両状態の応力は 図-3 の Mohr の円で表現される。ここで、2つのうち大きな方の円は kW が斜面の外側に向いたときの

図-2 地震時に斜面下の土の要素に作用する応力

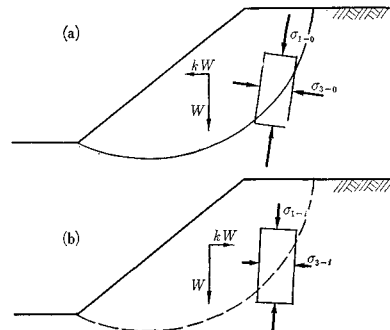
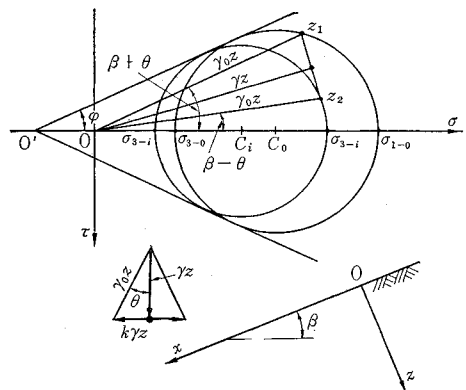


図-3 地震動の全サイクル中に斜面が破壊状態に達したときの主応力を求める Mohr 円



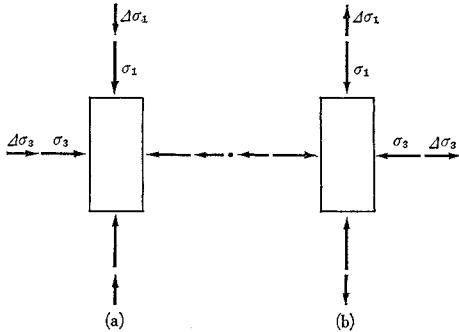
応力円である。これら2つの Mohr の円から両状態における合計4つの主応力の間には、次の関係があることがわかる。

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

ここに、 σ_{1-0} , σ_{3-0} はそれぞれ地震力が斜面の外側に向いたときの最大、最小主応力であり、 σ_{1-i} , σ_{3-i} はそれぞれ地震力が斜面の内側に向いたときの最大、最小主応

力である。また σ_1, σ_3 は破壊状態において、 $k=0$ に相当する場合の最大、最小主応力である。すなわち、地震時には主応力の大きさ方向はともに k の変化に応じて変化し、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-2 のすべり面上に作用しているせん断応力は一方方向のみに作用し、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発揮される。

図-4 地震時の周期的応力を模擬した場合の土の試料に与える応力

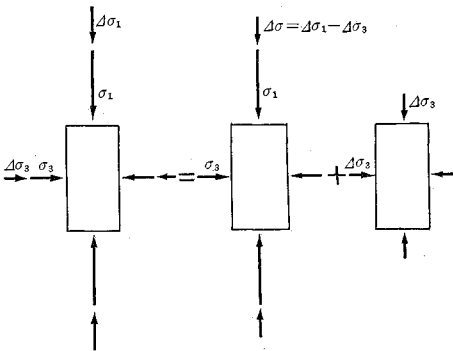


この応力状態を実験室の三軸圧縮試験で再現するには

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

として、図-4 (a), (b) に示す加圧、減圧の応力を交互に土の試料に与えればよい。しかるに図-4 (a) の実験は、図-5 の右辺に示したような2つの操作に分解することができる。飽和土の場合に、右辺第2項の操作は試料中の間げき水圧を上昇させるだけで、試料中の有効応力や変形を観察する場合には右辺第1項の実験のみ、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ということになる。ここで Seed が提案した上述の実験法で重要なことは、上述した非対称せん断応力を発生させるために

図-5 飽和土の動的非排水試験の説明図

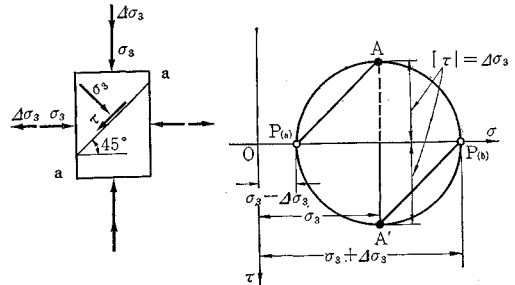


$$\Delta\sigma < \sigma_1 - \sigma_3 \dots\dots\dots(3)$$

でなければならないということである。

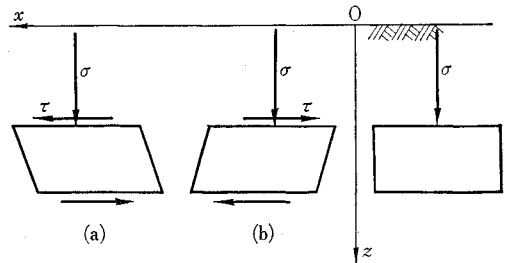
次に、土の試料を σ_3 で等方圧密して、軸方向ならびに側圧方向に対して、ある瞬間に図-6 に示したように

図-6 三軸試験で対称せん断応力を発生させるための説明図



$\pm\Delta\sigma_3$ なるパルス応力を与え、また次の瞬間には両方向にそれぞれこれと逆向きにパルス応力を与え、これらの操作を交互に繰り返すと、試料中の 45° 傾斜した面には、図の Mohr の円が示すように、常に垂直応力が一定の σ_3 であって、せん断応力が交互に向きをかえる等しい応力を与えることができる。これは前述した場合と異なって、ある面に対称せん断応力を与えることになる。このような応力状態は、図-7 に示した水平な地表面をもった地盤内の土の要素が地震時に下部の基盤から伝達されるせん断波を受けたときの応力状態を再現したことになる。

図-7 水平な地表面下の土の要素にせん断波が下部から作用した場合の応力と変形



しかしながら、三軸試験機で試料にこのようなパルス応力を与えることはきわめてむずかしいが、飽和土の場合に限って、図-5 にならって、側圧 σ_3 を一定に保って軸方向に $\pm\Delta\sigma = \pm 2\Delta\sigma_3$ なるパルス応力を周期的に与えれば、試料の変形、せん断応力に関する限り、図-7 の場合と同じである。地震時にゆるい砂地盤中に液化化現象がみられるが、液化化はこのような対称せん断応力による変形を水平な砂地盤が繰り返して受けたときに発生する。この原理にしたがって実験をすると、砂の試料に液化化を発生させるに必要なせん断応力 τ は次式で求められる。

$$\tau_l = \frac{1}{2} d\sigma \dots \dots \dots (4)$$

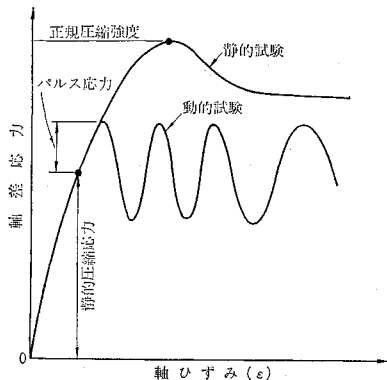
地震時の間げき水圧については、実験から得られた間げき水圧に対して $1/2 d\sigma$ だけ補正すればよい。Seed はこの実験結果にもとずいて、新潟地震における液状化の発生の可能性を解析したのであるが、この三軸試験による液状化の実験にはつぎのような問題点があることを最近指摘している。すなわち、その主なるものを列挙すると、① 地震時に主応力面の回転角度は 90° とは限らない。② 現場での現象は平面ひずみの応力状態のもとで行なわれるが、実験は軸対称の応力状態である。③ 自然地盤は K_0 状態で圧密されているが、上述の実験ではそのような応力状態ではない。

このために Seed は単純せん断試験機を作って、試料に周期的せん断応力のパルスを与えて、液状化を発生させるに必要なせん断応力を求めた。また、上述した三軸試験機による値と比較したが、この単純せん断試験機によるせん断応力の値は三軸試験機による値の 35% にすぎなかった。しかしながら、単純せん断試験機による実験でも実験上の問題点があり、それが液状化に要するせん断応力を小にしている傾向があるから、単純せん断試験機による値は三軸試験機による値の 50~55% 程度であろうと Seed は推測している。この正しい比較値を求めることが今後の研究課題であり、現在では三軸試験結果を補正するのが望ましい。

4. 試験結果の適用

最初に述べることは、斜面、アースダムなどがせん断破壊を起こす場合、すなわち非対称せん断破壊を起こす場合の試験結果の適用である。Seed は地震時には、図-8 に示すように、土の要素はある静的応力(常時応力)を受けている状態に、さらに周期的パルス応力を付加的

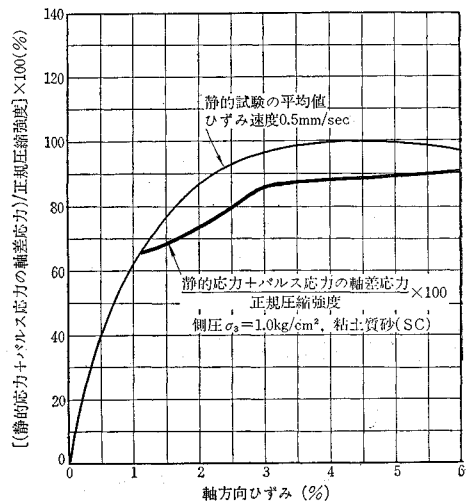
図-8 常時応力が作用しているところに、地震の周期的応力が作用した場合を模擬した試験における軸差応力とひずみの関係



に受けて破壊を起こすか、または大きな変形をひき起こすと考えた。あるパルス回数 N と試料のひずみ量 ϵ を規定した場合に、上記の(静的応力+パルス応力)の軸差応力の値の正規強度に対する百分率は、静的応力の正規強度に対する百分率が変化しても、一定に近い値を示すことが実験から得られている。すなわち、常時応力が大きければ、地震時にもちうる周期的応力の大きさは小になる。

いま $N=30$ として、種々のひずみを起こすための(常時応力+パルス応力)の軸差応力を縦軸(ただし、正規圧縮強度に対する百分率で示してある)にとり、横軸に軸方向ひずみ ϵ をとって示すと、図-9 のようにな

図-9 各ひずみにおける動的強度/正規強度の1例 (Ellis, 1967, ASCE より転載)



る。この図には、まず普通の静的なひずみ制御試験(これから得られる強度を正規強度と称する)から求められる応力とひずみ関係が図示されている。これから、パルス回数 N とひずみを与えたときの、動的圧縮強度の正規圧縮強度に対する比がわかる。この試験で側圧の大きさをどの程度にするかは、正規圧縮強度を求める場合の静的試験と同じようにすればよい。たとえば、成型粘土や砂に対しては $\sigma_1'/\sigma_3' = K_0 = 2$ 程度にとればよい。また不かく乱土に対しては、成型粘土の場合と同様にパルス応力を与える前の σ_1 と σ_3 とを決定すればよい。

次に、土塊の重心に慣性力 (kW) を水平に作用させて、正規強度から決定される c, ϕ を用いて臨界面を求め、すべりに対する安全率 F を決定する。実際には、このすべり面には、そのパルス回数とひずみに対応する動的せん断強度が作用するから、地震時の安全率 F は次式で求められる。

$$F = F' \times \frac{\text{動的強度}}{\text{正規強度}} \dots \dots \dots (5)$$

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 から決定した臨界円は変化しないという仮定にもとづいている。地震時にはすべり面に沿うて、 N と ϵ に応じた動的の c_1, ϕ_1 が存在するはずであるが、現在ではまだこの値が合理的に決定できないから、上述の仮定による簡便法が使用されている。

次に 図-1 (c) に示した堤体の横すべりの場合には、対称せん断応力を発生させる前述の試験から N と ϵ に応じたせん断応力（強度）を式 (4) より求めて、式 (5) の右辺の分子にこの値を代入して、 F を求めればよい。

さらに、地震動の継続中に堤体の斜面先付近で液状化または流砂現象が発生した場合は、この付近で有効応力がゼロになるから、堤体内部のせん断強度にのみ依存して計算を行わなくてはならない。このような場合には 図-1 (c) の点線のすべり面に沿うて正規強度から求めた安全率 F' ですら 1 以下になる可能性がある。

従来地震動による間げき水圧の把握のみに着目したために、解法を不能に近い状態にしていたが、ここで述べたことは有効応力の減少にとまらぬひずみの増大に着目していることが特色である。また当面の加速度にとらわれず、パルス回数 N による強度変化を重要視している。これは小さな応力振幅でも、破壊や変位を支配するものは、 N であるということと、このような実験の可能性に

忠実にしたがっているためである。

さて、応答解析から有効パルス数 N とそのときの平均パルス応力を決定することができると、それと実験から求めた 4σ の値を比較して破壊の検討を加えることはできるが、耐震設計は急を要する問題であるので、一応式 (5) で設計して、逐次改良を加えることが望ましい。

以上応力制御試験を主体として述べたのであるが、土圧の場合などでは壁の変位速度と合致させたひずみ制御試験が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) Lee, K.L. and H.B. Seed : Dynamic Strength of Anisotropically Consolidated Sand., Journal of the Soil Mech. and Foundations Division, Proc. of ASCE, Vol. 93, No. SM5, Sept. 1967.
- 2) Seed, H.B. : Soil Liquefaction in the Niigata Earthquake., 日本地震工学シンポジウム, 1966
- 3) Ellis, W. and V.B. Hartman : Dynamic Soil Strength and Slope Stability., Journal of the Soil Mech. and Foundations Division, Proc. of ASCE, Vol. 93, No. SM4, July, 1967.
- 4) Peacock, W.H. and H.B. Seed : Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions, Journal of Soil Mech. and Foundations Division, Proc. of ASCE, Vol. 94, No. SM3, May, 1968.
(1968.10.12・名古屋大学教養部にて講演)

★新刊

土木技術者のための鋼材知識

鋼材倶楽部編 A5判・384頁/定価 1,600円
編集代表者 奥村敏恵

本書は土木技術者として日頃鋼材を使用するにあたって知っておくべき基礎知識をできるだけ、平易に総括的にならべて、解説したもので、まず鉄鋼材料が造り出される過程と製品の流通機構に関して述べ、ついで鉄鋼の基本的性質、その試験法の概要、さらに各種鉄鋼材料を分類し、TIS規格を中心として、それぞれの性質、特長、各用途別にどんな鋼材をどのような観点からどう使用したらよいかなど鋼材の全般にわたり解説した好書。

変断面ラーメン設計法

石川時信著 B6 / 400円

応用力学

荒井利一郎著 A5 / 950円

構造力学における還元法

ケルステン著・伊藤訳 B5 / 1,500円

薄肉弾性ばりの理論

ウラーソーフ著・奥村訳 B5 / 1,800円

プレストレスト コンクリート

構造物設計図集

P・C 技術協会編 B4 / 1,500円

建設業の昔を語る

飯吉精一編著 A5 / 1,500円

東京都港区赤坂 1-9-4 (☎107) 技報堂 TEL. 585-0166・振替東京10