

AE からみた砂の粒子挙動

BEHAVIOR OF SAND PARTICLES DETECTED FROM ACOUSTIC EMISSION

村山 朔郎*・道広 一利**

By Sakuro MURAYAMA and Kazutoshi MICHIIRO

In order to detect the microscopic behavior of sand particles, acoustic emission emitted from sand under various shear stress levels was measured. From these experiments the following conclusions were obtained. (1) Acoustic emission and stress-strain relationships under two types of repetitional shearing tests were compared. One was the ordinary repetitional shear test. The other was the repetitional shear test on the sand which had been subjected to the repetitional shear along the direction perpendicular to the shear direction. Each compared characteristic was found to be different. (2) Kaiser effect of sand was realized according as the sand became elastic. (3) From the pattern of relationships between applied stress and number of acoustic emission three states of sand - elastic, elastoplastic and failure states - were classified.

1. はじめに

地盤や土構造物の沈下, 変形に関する問題の解明には土の応力・ひずみ関係を明らかにすることが必要である。この関係は, 土の微視的な粒子挙動によって支配される土の外作用とその応答関係といえよう。この点に立脚して, 村山は微視的な立場から砂の構成式^{(1)~(3)}を理論的に導いた。そのような微視的な方法による構成式の誘導過程を採る場合には, 過程の妥当性を立証するために微視的な現象が照査できる実験方法の開発が要望される。そこで粒子挙動の観測手段の一つとして, 砂粒子の移動によって発生する微震音響パルス (Acoustic Emission, 以後 AE と記す) を利用することの意義とその有効性を指摘⁽³⁾したが, ここではそのような立場で砂の粒子構造を AE を介して実験したので, ここに報告する。

AE は従来主として金属分野において, 材料の疲労, 亀裂および破壊の予知などに幅広く利用されてきたが, 近年, 金属以外の材料としてコンクリート, 岩盤などに

についても AE 特性が解明^{(4), (5)}されている。また, 土の分野においても, 土の破壊予知に関連した研究^{(6), (7)}などがみられるが, まだ他の分野に比較して研究例はそれほど多くない。

本論文では, 砂をせん断するときの砂の応力・ひずみ関係を観測すると同時に AE を検出し, さきに述べた砂の構成式^{(1)~(3)}と対比して両者の関係を解析して, (i) 砂の基本的状態には弾性, 弾塑性および破壊の三状態が存在すること, (ii) 各状態での砂粒子の挙動に相違があること, (iii) 砂のカイザー効果 (Kaiser Effect) の特性ならびに載荷方向の異方向性が粒子構造やカイザー効果に及ぼす影響などを検討した。

2. 試料, 実験装置, 実験方法

実験に使用した砂試料は, 豊浦標準砂をふるい分けして 0.42 mm ふるいを通過し, 0.105 mm に残留したもので, その粒径加積曲線を Fig. 1 に, また, 試料砂の諸物性を Table 1 に示す (G_s : 砂粒子の比重, D_{10} : 有効粒径, C_u : 均等係数)。

Table 1 Properties of Toyoura Sand.

G_s	D_{10} (mm)	C_u
2.64	0.23	1.40

* 正会員 工博 京都大学名誉教授
(〒603 京都市北区紫竹上梅ノ木町 26)

** 正会員 工修 摂南大学講師 工学部土木工学科
(〒572 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

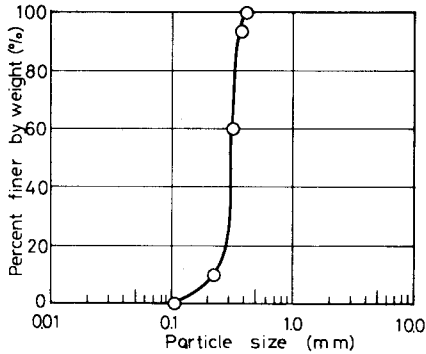


Fig. 1 Grain size distribution curve of used sand.

実験装置の構成を大別すると、一面せん断試験装置と AE 観測装置とからなる。ここで用いた一面せん断試験機は在来型の下部可動式試験機のせん断箱を Fig. 2 に示すように内のり縦・横それぞれ 211.8 mm、高さ 80.0 mm の正方形の二段の箱に改造したうえ、さらに垂直荷重を載荷したまま、せん断箱を 90° 水平に回転できるようにして、同一砂試料を X, Y 各方向 (X: 砂が最初にせん断される方向, Y: 水平面上で X と直交する方向) でせん断することを可能にしたものである。せん断箱を動かすモーターはシンクロナスモーターで、それに無断変速機を直結してせん断速度が調節できるようにした。変位の測定には 1/100 mm の精度のダイヤルゲージを、垂直荷重およびせん断力の測定には、それぞれのロードセルを使用した。せん断変位とせん断力の測定はダイヤルゲージとロードセルの出力を x-y レコーダーに接続して変位～せん断力曲線を描かして、この曲線から測定することとした。一方 AE の観測装置は、トランスデューサー、プリメインアンプ、ディスクリミネーター、カウンター、ウェーブメモリー、シンクロナススコープおよびペンレコーダーから構成されており、そのブロックダイヤグラムは Fig. 3 のようである。AE 検出用トランスデューサーは、共振周波数 40 kHz のジルコニウム酸鉛製のものを使用した。プリメインアンプは、フィ

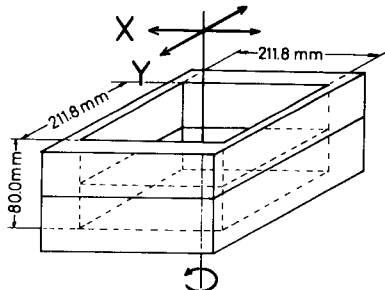


Fig. 2 Mechanism of used shear box.

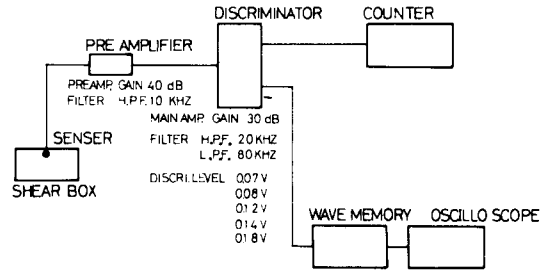


Fig. 3 Block diagram of AE apparatus.

ルターと増幅の両機能を有しており、今回の実験では H. P. F. (High Pass Filter) を 10 kHz に、利得を 40 dB に固定した。ディスクリミネーターは、フィルター、増幅および閾値設定機能を有しており、フィルターとしては H. P. F. を 20 kHz に、L. P. F. (Low Pass Filter) を 80 kHz に、利得を 30 dB に固定し、閾値はディスクリミネーターのレベルを 1 目盛 1 mV のポテンシオメーターにより電圧として設定し、70 mV、80 mV、120 mV、140 mV および 180 mV の 5 段階の閾値で試験ができるようにした。カウンターの計数表示は、カウンターゲートの 1 s 間における開閉時間を 0.5 s 間隔にしたので 0.5 s 間に入力されたパルスが単位時間 (1 s) 当たりの個数としてデジタル方式で表わされることになる。波形観測は、アンプで増幅された入力波をウェーブメモリーに蓄え、それらの波を自動変換してオシロスコープに現示させるが、その現示された波のパーティクルオービットをみて入力された波が実体波であるかどうかを判定し、実体波の場合のみを実験に採用するようにしている。

せん断試験は次の二方式の実験を行った。実験一Ⅰ；ゆるぎめの砂試料に一定垂直応力のもとで一定応力振幅 τ_{ap} の片振幅繰返しせん断を与えて残留変位の増加がほとんど認められなくなったあと供試体をせん断破壊させる方式。実験一Ⅱ；まず実験Ⅰと同様に、X 方向で残留変位の増加がなくなるまで十分繰返しせん断を与えたのち、当初の垂直荷重を変化させずに Y 方向へせん断箱を 90° 転回させ、さらに Y 方向の位置で残留変位の増加がなくなるまで十分繰返しせん断を与える方式、およびさらに再び X 方向へせん断箱を転回させて同様の繰返しせん断を行い、以後同じ操作を、X, Y 各方向の残留変位の増加が止まるまで繰返したのち供試体をせん断破壊させる方式との 2 つの方式。

なお繰返しせん断応力片振幅の波形は Fig. 4 に示すような三角波形を与えたが、その周期は繰返し回数の増加とともに短くなった。図中縦軸はせん断応力の片振幅を横軸は時間を表わしている。なおここで用いたせん断速度は繰返しせん断のときも、せん断破壊の実験のときも

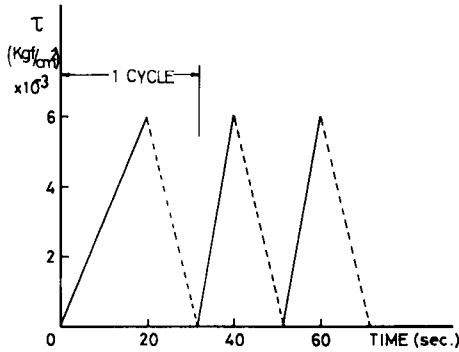


Fig. 4 Wave form of stress amplitude.

ともに一定の 1 mm/min とした。

3. 砂の各状態の定義^{注1)}

(1) 砂の弾性状態

一般に弾性状態とは、載荷した応力を除荷したとき、ひずみが載荷時と同じ経路で瞬時に回復し残留ひずみが生じない状態と定義されているが、今回実験に用いたような砂の場合では、一定垂直応力 σ_n のもとで一定せん断応力 τ_{ap} を片振りで載荷と除荷を繰返し、除荷時に残留変位の増加が認められなくなった状態を弾性状態と定義している。また、この砂のもつ弾性限界値をせん断/垂直応力比 s_{el} で表わせば $s_{el} = \tau_{ap} / \sigma_n$ となる。

弾性状態を砂粒子の微視的挙動からみれば、応力の載荷と除荷に応じて相対的に滑動した粒子が初期の位置と構造障壁との間を往復するとき現われる状態と考えられている¹⁾。砂試料が繰返しせん断によって弾塑性状態から弾性状態に移行するまでの残留変位の増加過程を表わす関係は次式のように導かれている。

$$n / \delta_n = a + b \cdot n \quad (a, b : \text{定数}) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 n は片振幅繰返しせん断の回数、 δ_n は 1 回目の載荷時より n 回目の除荷時に至るまでの総残留ひずみ。いま、 $n \rightarrow \infty$ のときの δ_n を δ_∞ と記せば、 δ_∞ は式(1)より

$$\delta_\infty = 1/b \dots\dots\dots (2)$$

となる。

(2) 砂の弾塑性状態

一定垂直応力 σ_n のもとで弾性状態にした砂にせん断応力 τ を加える場合を考えよう。このとき加えた応力比 z ($z = \tau / \sigma_n$) が弾性限界応力比 s_{el} 以上で破壊応力比以下の場合には、そのとき生じたせん断ひずみは、せん断応力を除荷しても完全には元のひずみに戻らない。この応力下の砂の状態を砂の弾塑性状態と定義する。こ

の状態においては、砂粒子はせん断応力の載荷によって構造障壁を越えて、次の安定位置へ転移 (dislocate) し、そこで弾性時の粒子状態となって、せん断応力を除荷しても当初の位置へ戻らないためと考えられている²⁾。

弾塑性状態に対して誘導された載荷応力比 z と弾塑性せん断ひずみ γ_p との関係式は次式²⁾で示される。

$$\gamma_p = A_e \cdot W_e \cdot x \cdot (s_\infty - s_{el}) \frac{(z - s_{el})}{(s_\infty - z)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 γ_p は、砂が弾性状態から弾塑性状態に移行したあとに生じる最大せん断ひずみ、 A_e 、 W_e は、それぞれ砂が弾性状態にあるときの粒子の変位係数と構造係数、 x は弾塑性時の粒子の移動距離と弾性時のそれとの関係を表わす係数、 s_∞ は、砂が弾塑性状態を継続しつづけたと仮定したとき、すべての粒子が滑動するのに要する z の値である。 A_e 、 W_e 、 x および s_∞ の各値は砂が一定であれば一定であるから

$$A_e \cdot W_e \cdot x (s_\infty - s_{el}) = B, (B : \text{const.}) \dots\dots\dots (4)$$

とおくことができる。また、一定垂直応力 σ_n のもとでの一面せん断試験では、式(3)において γ_p を弾塑性状態におけるせん断変位 $\delta_p (= \delta - \delta_{el})$ に、応力比 z 、 s_{el} 、 s_∞ をそれぞれ、せん断応力 τ 、 τ_{el} 、 τ_∞ に置き換えると式(3)は次式になる (δ_{el} : 弾性限界ひずみ)。

$$\frac{(\tau - \tau_{el})}{\delta_p} = \frac{(\tau_\infty - \tau)}{B} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)は $(\tau - \tau_{el}) / \delta_p \sim \tau$ 関係が負の傾きをもつ直線で表わされることを示している。

(3) 破壊状態

砂に破壊応力比以上のせん断応力比 (σ_n は一定) を加えれば、その応力のもとでは、砂のひずみは際限なく増加しようとする状態となる。この状態を砂の破壊状態という。破壊状態においては、粒子間力によって移動する粒子はそれに作用している粒子間力が大きいため移動後安定が得られず、そのため残りの粒子も次々と移動に移る。ゆえに破壊状態は、すべての粒子がとめどもなく移動をつづける状態と考えている。

4. 実験 I の結果とその考察

(1) 繰返しせん断時の応力-変位関係

一定垂直応力のもとで砂 (試料 A) に一定せん断応力片振幅を繰返し与えると Fig. 5 のように繰返しせん断時の応力-変位関係曲線は、繰返し回数の増加とともに徐々に残留変位の増加率が減少し、最終的にはある傾きをもつヒステリシスループ上を移動するようになる。初期間隙比をほぼ等しくした A, B, C の三試料 (試料 A : 初期間隙比 = 0.745, 試料 B : 0.742, 試料 C : 0.740) について同様のせん断試験を行い、繰返しせん断中の繰返し回数 n と n 回目の載荷時の総変位 δ_n および、それ

注1) 本章3. で述べる内容は文献1)~3) に記した成果を要約したものである。

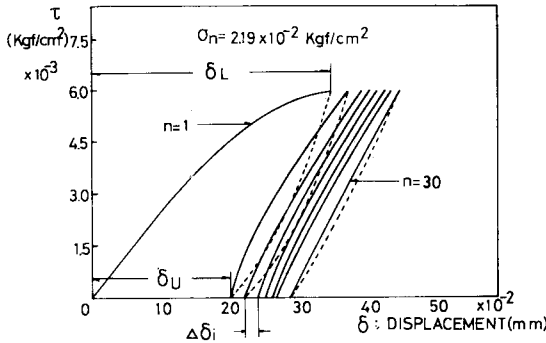


Fig. 5 Relationship between stress and displacement obtained by repetitional shear test. (1 kgf/cm²=98 kPa)

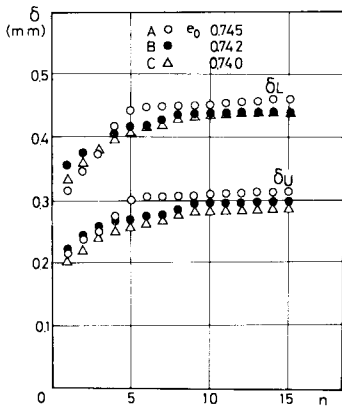


Fig. 6 Relationships between δ and n .

を除荷したときの総残留変位 δ_u との関係をもとに Fig. 6 となる。それぞれの試料において、この両曲線は繰返し回数の増加とともにほぼ等間隔を保ちつつ増加し、最終的にはおのおの一定変位を示し横軸と平行になる。 $n-\delta_u, \delta_L$ 関係において、せん断最終時の二曲線間の距離が等しいことから、最終的な応力-変位曲線のヒステリシスループの傾きは同一試料砂において等しいことがわかる。一方、このデータを式 (1) の繰返し回数と残留変位の関係として表わしたのが Fig. 7 である。同一試料、同一試験による試料 A, B, C それぞれの関係も直線関係を示しており、この実験結果からも、式 (1) の妥当性が検証されたといえる。したがって、繰返し回数を無限大にしても残留変位は有限な一定の値をとることとなる。この最終状態は 3. で定義した弾性状態であり、このように砂は一定のせん断/垂直応力比の繰返し載荷を加えることによって弾性状態となる。

(2) 弾性状態以後の応力-変位関係

一定の垂直応力 σ_n のもとで繰返しせん断応力 τ_{ap} を加えて弾性状態にした砂 (この砂の弾性限界は τ_{ap} となる) を元の垂直応力を一定に保ったまません断応力 τ

を増加していけば、砂は τ が τ_{ap} 以上になると弾塑性状態となり、さらに増加すれば最終的には試料は破壊する。ここでは、 τ_{ap} 以上のせん断応力 τ を受けた場合の応力-変位の関係について検討する。弾塑性状態の構成式としては式 (5) がある。式 (5) に沿ってデータを整理すれば Fig. 8 となり、理論式で示したように負の傾きをもった直線で示される。Fig. 8 において横軸の τ の小さいところでは若干ばらつきが見受けられるが、これは弾性状態から弾塑性への移行過程の部分と考えられる。

(3) 砂のせん断中における AE 特性

a) 砂におけるカイザー効果

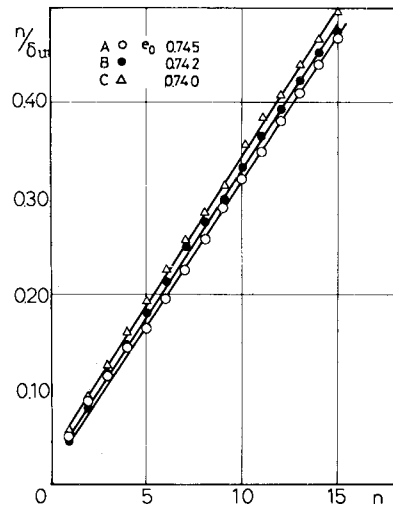


Fig. 7 Relationships between n/δ_u and n .

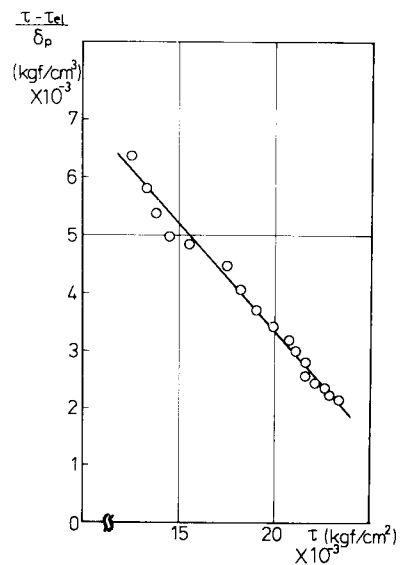


Fig. 8 Relationships between $(\tau - \tau_{el})/\delta_p$ and τ . (1 kgf/cm²=98 kPa)

たとえば金属材料に応力を増加していくと、応力の値が過去にその材料が受けた最大応力値を越えるまでは AE 信号の発生はほとんど検知できない。この現象をカイザー効果という。金川ら¹⁾は岩石に軸圧縮試験機をカイザー効果に対してカイザー効果により求めた推定先行荷重の誤差は、ほぼ 15% 以内であったという報告をしている。また、丹羽ら²⁾によって鉄筋コンクリートを用いた場合のカイザー効果についても報告されている。しかしながら土を対象とした事例はまだあまり見受けられない。

今回の実験において、一定垂直応力下で砂に一定せん断応力片振幅を繰返し与えたと Fig. 5 に示したように各 1 回の繰返しサイクルで生じる残留変位 $\Delta\epsilon_r$ はサイクル数が増すにつれて減少し、ついに消滅して砂は弾性状態となる。一方、せん断開始後各サイクル中に発生した AE の総計数 N と、そのサイクル中の残留変位 $\Delta\epsilon_r$ の関係は Fig. 9 に示すように N は残留変位に応じて減少し、AE が検知されるのはせいぜい 4~5 サイクルまでで、その後はほとんど認められない。すなわち、砂の場合のカイザー効果は、金属材料のように面然と発現するものでなく弾塑性状態の砂が弾性化して、残留変位 $\Delta\epsilon_r$ が減少するにつれて、漸進的に現われることがわかる。

このように AE の発生が感知できる期間は砂に弾塑性状態が残っている間であることから、AE 発生数は弾塑性時や破壊時に生ずる砂粒子の転移数に依存しているものと考えられる。

b) 応力-変位曲線と AE の相関性

繰返しせん断によって弾性状態にした試料に対して、

せん断応力 τ を載荷する過程での応力 τ -変位 δ 、AE の累計数 N -変位 δ の関係を Fig. 10 に示す。図の応力-変位曲線より、弾性限界せん断応力 τ_{el} および破壊点を求め弾性、弾塑性および破壊領域を区別し、各領域に対して AE 累計数 N -変位 δ の関係を比べてみると、弾性領域においては前述のカイザー効果により、AE の発生

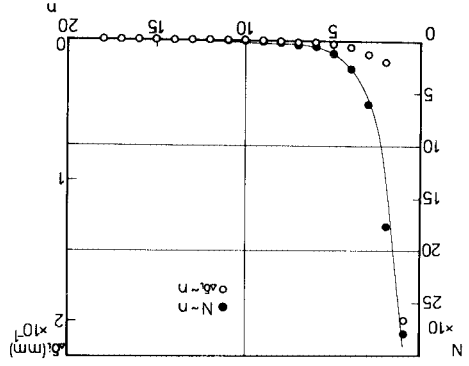


Fig. 9 Relationships among n , N and δ .

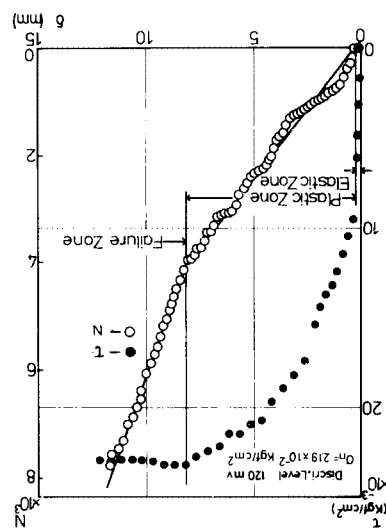


Fig. 10 Relationships among δ , τ and N .

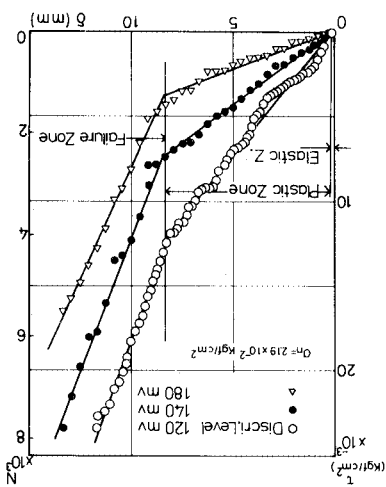


Fig. 11 Relationships between N and δ under various discrimination levels. (1 kgf/cm²=98 kPa)

はみられない。弾性状態以降の AE 累計数と水平せん断変位 δ との関係はいずれのデータも折線をもつ直線で示され、折点は砂の各状態領域の境界と一致している。 N - δ 関係において折線を境にして勾配が変わっているのは、砂が各状態で異なった奉動を示している。このように砂粒子の微視的奉動により発生すると推定される AE の特性が弾性、塑性および破壊の三状態に対応して変化することから、AE の特性からも砂のせん断過程における各状態の存在が確認されたと見える。また、AE 累計数-水平変位関係において、71 サイクルレベル (閾値) をパラメーターにとったものを Fig. 11 に示す。いずれの折線においても直線の勾配の違いこそ

あれ折点に対する変位は各領域の境界の変位を示している。なお、直線の勾配の違いは閾値の設定と対応している。

以上のことから次のようにいえよう。弾性限界以上のせん断応力を加えたとき、単位水平変位中に感知されるAE数は、単位水平変位を生じるために転移した砂粒子数に比例するとみられるので、各状態における砂粒子1個の平均転位距離の水平成分は各状態ごとに一定である。

5. 実験Ⅱにおける実験結果とその考察

(1) X, Y各方向で繰返しせん断をした砂の応力-変位特性

(a) 実験-a; 前章では一方向(X方向)のみの繰返しせん断による砂の弾性化について論じたが、ここでは砂をX方向に繰返しせん断を行って弾性状態にしたのち、その一定垂直応力をそのままに保ち、せん断箱を90°回転してY方向で砂に繰返しせん断を与えてY方向にも弾性状態にした。X, Y各方向において砂が弾性状態に至るまでに生じた総残留変位をそれぞれ δ_x ,

δ_y とする。同じ砂で作った新鮮試料それぞれに対してこの一連の試験を行い、各試料で得られた δ_x , δ_y をそれぞれ横軸、縦軸に対して表わすとFig.12となる。図よりみればいずれの試料においても弾性化に達するまでに生じたY方向の総残留変位 δ_y はX方向の総残留変位 δ_x の50~65%の範囲になっている。したがって、砂をX方向において弾性化したことがY方向に弾性化することに及ぼした影響量は35~50%の範囲であったことがわかる。

(b) 実験-b; 次に、X方向で弾性状態にした砂のせん断方向を水平に90°回転して、Y方向で繰返しせん断を行って、Y方向に対して弾性状態にしたのち、元のX方向に回転すると、一度はX方向で弾性状態になった試料がY方向の繰返しせん断により、砂粒子配列が変化を受け、最初得ていたX方向の弾性状態は崩されていることがわかった。そこで、再びX方向での繰返しせん断を行うと、この場合は数回の繰返しせん断により再びX方向は弾性状態に至る。しかし、この砂を再びY方向に回転すると、Y方向の弾性状態はやはり多少崩されている。そのためX方向とY方向の繰返しせん断による弾性化操作を交互に何回か(この試験では42回)繰返せば、ついにX方向にも、Y方向にもともに完全な弾性状態となるに至る。なお、ここに述べた完全弾性状態とはX, Y両方向とも弾性である砂の状態をいうことにする。これらのX, Y各方向の交互の弾性化に至る過程の応力-変位関係の一例をFig.13に示す。図よりみれば、X, Y両方向のいずれにおいても、それぞれの方向での弾性化までの繰返しせん断の回数は、X, Y各方向での弾性化操作の繰返し回数の増加とともに減少する。また、X, Yそれぞれの方向での弾性化までの総残留変位の量も同様に、X, Y各方向での弾性化操作の繰返し回数の増加とともに減少している。

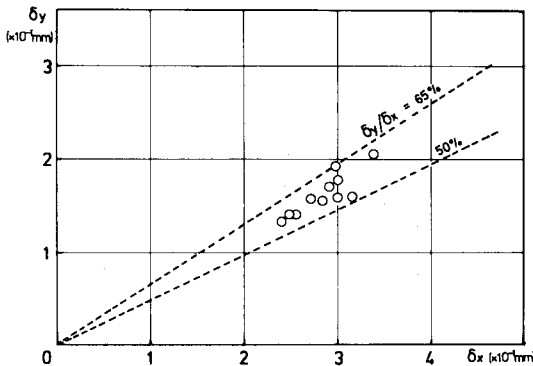


Fig.12 Relationships between δ_x and δ_y .

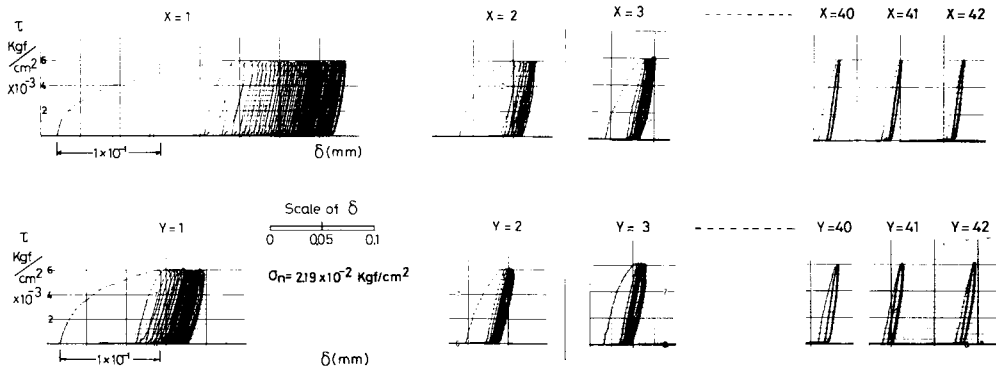


Fig.13 Relationships between stress and displacement obtained by repetitional shear test in X and Y directions, (1 kgf/cm²=98 kPa)

上述の砂の弾性化に伴う残留ひずみの増進の減少現象は、弾塑性状態の砂がせん断の付与によりひずみ硬化を生ずる現象と粒子機構を同じくしている¹⁰⁾。ゆえに以上の実験からみれば、砂では一方のせん断の付与によって、その付与の方向にひずみ硬化を生じさせるとともに、付与の方向と直交する方向にも35~50%の寄与をしていることが認められる。このことによって、一方のせん断の付与によって生ずるひずみ硬化の異方性の程度をはかることができる。

(2) X, Y 各方向で繰返しせん断をした砂の AE 特性

実験-aで X, Y 各方向における第1回目のせん断終了時まで発生したそれぞれの方向での AE 累計数を示すと Fig. 14 になる。図より Y 方向で発生した AE 累計数 N_y は、X 方向の累計数 N_x のほぼ40~50%の範囲である。この値を実験-aの X, Y 各方向の弾性化までの総残留変位の関係 Fig. 12 と比較すれば、若干の差はあるが、ほぼ似た値になっている。このことは、当初弾塑性状態にある砂試料がある大きさのせん断応力を受

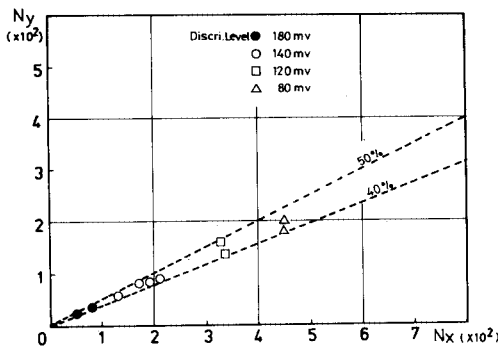


Fig. 14 Relationships between N_y and N_x .

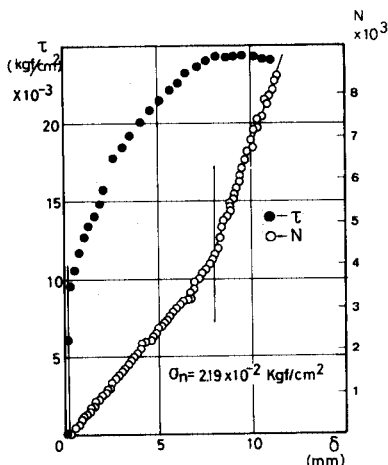


Fig. 15 Relationships among δ , τ and N .

けたときに発生する AE 累計数は、その粒子配列の砂が、そのせん断応力を繰返し弾性状態に移行するまでに発生する総残留変位と比例しているといえる。そのため、この AE 関係によって X, Y 各方向に対して砂の弾塑性状態の中に含まれる塑性成分の程度、および、それが X, Y 各方向に対してどの割合になっているかを知ることができる。

次に、X, Y 各方向の繰返しせん断を交互に行って完全弾性状態にした試料を X 方向において破壊までせん断させたときの AE 累計数とせん断変位、ならびにせん断応力とせん断変位の関係を示したのが Fig. 15 である。一方、さきの Fig. 10 は X 方向のみの繰返しで弾性状態になった砂をせん断したときの変位と AE 発生数の関係であるがこの Fig. 10 を完全弾性砂に対する同様な Fig. 15 と比較すると、Fig. 15 の方が各状態領域とも変位と AE 発生数との比例関係は、ばらつきがより少ない関係になっていることが認められる。これは完全弾性砂の粒子配列が X 方向のみに弾性化した砂の粒子配列に比べて一層整然としているからであるといえる。

(3) 完全弾性状態の砂の力学特性

一方 (X 方向) のみ弾性化した砂を完全弾性にするため X, Y 各方向に繰返し弾性化していく操作過程で砂の力学特性がどのように変化するかを知るため、各過程での砂の弾性係数とせん断強度を比較した。なお、ここに弾性係数としては、砂がそれぞれの方向で弾性化して応力-変位曲線がループを描くようになったとき、そのループの始点と終点を結ぶ直線(ループの軸と仮称)の立上がり勾配で示すこととした。そのため、まず Fig. 13 より各回の応力-変位曲線のループの立上がり勾配を取り出し、X, Y それぞれの方向に対して、それらのループの軸の立上がり勾配 $d\tau/d\delta$ と弾性化操作の回数 n_p との関係を示したのが Fig. 16 である。図よりみると X, Y 両方向とも回数 n_p の増加とともに、ごくわずかであるがループの立上がり勾配がきつくなっていく。このことは、X, Y 各方向交互の繰返し弾性化操

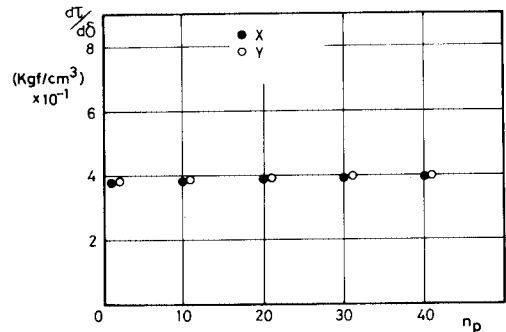


Fig. 16 Relationships between $d\tau/d\delta$ and n_p .

作により砂試料の弾性係数が増加していくことを示すものである。なお、Fig. 17はX方向の繰返しせん断において垂直応力 σ_n を種々に変えた場合、砂が弾性化したときのループの軸の立上がり勾配 $d\tau/d\delta$ と σ_n の関係を示したものである。この図によれば、ループの軸の勾配は σ_n が変化してもほとんど変化していない。ゆえに砂の弾性は σ_n の影響よりも粒子配列が完全弾性化することの方が大きく影響することが確かめられた。

次に、一方向(X方向)にのみ弾性化した砂とX、Y両方向とも弾性化した完全弾性状態の砂のせん断強度変化を調べた結果、いずれのデータもX、Y両方向とも弾性化した完全弾性砂のせん断強度はX方向のみ弾性化した砂のせん断強度より数パーセント増加している。その一例がFig. 18である。このことは、さきに述べた繰返しによる弾性係数の増加と共通した関係があると考えられる。

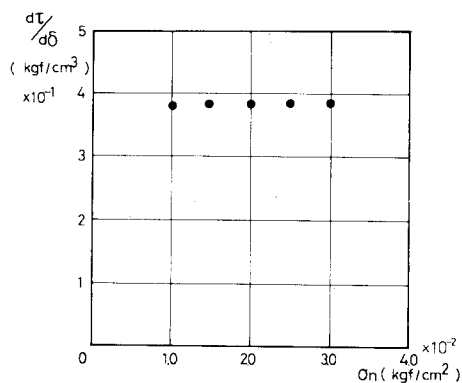


Fig. 17 Relationships between $d\tau/d\delta$ and σ_n .
(1 kgf/cm²=98 kPa)

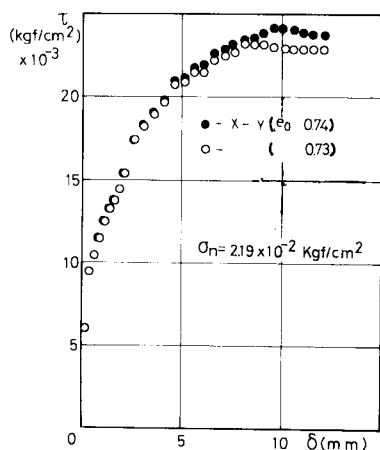


Fig. 18 Relationships between stress and displacement.
(1 kgf/cm²=98 kPa)

6. むすび

この報告は、村山が微視的な立場から導いた砂の構式的誘導過程の検証と砂の変形に伴う粒子状態の異方性を知るため、一面せん断試験機を用いて、砂の変形特性とAE現象を粒子構造の面から解明したものである。得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 砂試料に一定垂直応力のもとで、一定の大きさのせん断応力を繰返し与えたとき、弾塑性状態から弾性状態に達するまでに発生する残留変位 δ_n と繰返し回数 n との関係は、次式が提案されていたが、この実験でも妥当であることが実証された。

$$n/\delta_n = a + b \cdot n \quad (a, b: \text{定数})$$

(2) 繰返しせん断の回数の増加とともに、残留変位の増加率は減少するが、同時にAE発生割合も減少してゆき、砂が弾性状態に達すると、AEの発生はなくなる。このことは、砂におけるカイザー効果であって、砂の場合は金属材料などの場合のように先行応力の点で画然と現われるのではない。すなわち砂の場合では、AEの発生は弾塑性状態の中に含まれる塑性の成分に比例し、弾性化して塑性成分が減少するに伴い徐々に減少する。

(3) AEの発生特性は、砂の弾性状態、弾塑性状態および破壊状態によって異なり、弾塑性および破壊の各状態では、それぞれの状態ごとに、砂の水平変位にほぼ比例して発生する。このことは、単位ひずみ中に発生するAE累計数が単位ひずみを生じるために転位する粒子数に比例するとみられることから、粒子1個の平均転移距離は弾塑性および破壊の各状態ごとで一定であると推定される。

(4) X方向の繰返しせん断を行って弾性状態を作り出すときの総残留変位 δ_x を求めたのち、垂直応力を変化させずにせん断箱を水平に90°回転させたY方向について同様に弾性状態にするまでの総残留変位 δ_y を求めると、 δ_y/δ_x の比は35~50%であることがわかった。

(5) 砂の弾性化過程は弾塑性状態の砂がせん断の付与によりひずみ硬化を生じる現象と粒子機構を同じくしているとみられる。ゆえに上記(4)の結果、砂では一方向のせん断の付与により、ひずみ硬化に異方性が存在することになるが、その効果は付与の方向と直交する方向に35~50%の寄与をしていることが知られた。

(6) 上記(4)の実験の際のAE発生をみれば、繰返し第1回目にX方向を弾性状態にするまでのAE累計 N_x と、同様の第1回目のY方向のAE累計 N_y の比 N_y/N_x は、いずれの試料でも40~50%の範囲内であり、この値は上記の35~50%とほぼ一致しており、

このことによっても X , Y 両方向の粒子状態の異方性を推定することができる。

(7) 繰返しせん断によって一方向 (X 方向) に弾性化した砂と, X , Y 両方向ともに弾性化した砂を比較すると, 後者の方が弾性係数もせん断強度も大きくなっている。

最後に本研究において, 京都大学 小林昭一教授に AE 装置についてのご助言を受け, また実験においては元摂南大学学生 坂上敏彦君 (川崎地質 KK) の援助を得た。ここに深謝する次第である。なお, 用いた AE 装置は昭和 53 年度文部省科学研究費によるものである。

参 考 文 献

- 1) 村山朔郎: 弾性状態にある砂の構成式, 土木学会論文報告集, 第 236 号, pp. 125~137, 1975.
- 2) 村山朔郎: 塑性状態にある砂の構成式, 土木学会論文報告集, 第 251 号, pp. 77~89, 1976.
- 3) Murayama, S.: Constitutive equations of particulate material in the failure state, Proc. Spec. Session 9, 9 th I. C. S. M. F. E., pp. 183~190, 1977.
- 4) 金川 忠・林 正夫・仲佐博裕: 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み, 土木学会論文報告集, 第 258 号, pp. 63~75, 1977.
- 5) 村山朔郎・道広一利・斉藤二郎・藤原紀夫・吉岡尚也・畑 浩二: アコースティック・エミッションによる初期地圧の推定方法, 岩盤力学シンポジウム, pp. 160~164, 1984.
- 6) Tanimoto, K. and Noda, T.: A study of acoustic emission from sandy soils, Proc. 9 th. I. C. S. M. F. E. pp. 315~318, 1977.
- 7) 谷本喜一・中村潤一・石川正紀: 土のダイレイタンス特性と AE 特性の相関について, 土木学会関西支部年次学術講演概要集, pp. III-6-1~III-6-2, 1984.
- 8) 丹波義次・小林昭一・大津政康: コンクリート構造物のアコースティック・エミッション特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 261 号, pp. 101~112, 1977.
- 9) 丹波義次・小林昭一・大津政康: アコースティック・エミッションの発生機構に関する考察, 土木学会論文報告集, 第 314 号, pp. 125~136, 1981.
- 10) Murayama, S.: Constitutive equations of particulate material in the plastic state, Proc. Spec. Session 9, 9 th I. C. S. M. F. E., pp. 175~182, 1977.

(1984. 4. 2・受付)