

(79) 繰返しせん断を受けている砂の土圧係数

宇部工業高等専門学校 大原資生

山口大学工業短期大学部 ○山本哲朗

1. まえがき 本研究は繰返しせん断時の乾燥砂の水平応力の鉛直応力に対する比および主応力の比で定義した地震時土圧係数 C_0 、 C_0' が振動加速度の大きさおよびせん断方向によってどのように変化するかを明らかにすることをみるために、振動台上にとりつけたKjellman型の単純せん断試験機を用いた実験を行った。また、その結果からJakyの式を用いて振動中の砂の内部摩擦角が見掛け上どの程度変化するかを調べた。さらに、飽和砂の実験も行つて、液状化を生じる過程における土圧係数の変化を調べた。

2. 実験装置 図-1は実験に用いた振動台上に固定したKjellman型単純せん断試験機を示す。この試験機では供試体の側方への膨れ出しが防止でき、しかもせん断変形もほぼ自由に生じることができる。その反面、繰返しせん断時の水平応力が測定できないという問題点があったが、今回の実験では先の試験機¹⁾のせん断箱を改造することで水平応力を正確に測定するように試みた。すなわち、直径30cm、高さ約5cmの供試体の周囲に積み重ねた5枚の塩化ビニール板製リング（外径35cm、内径30.2cm、厚さ1cm）のうちで上から3枚目のリングを用い、その内面と受圧面がツラーとなるようにし、さらに互いが直角をなす位置に4個の小型圧力変換器（受圧面径：6mm、容量：196kPa）¹²⁾をはめ込み、振動方向およびそれと直交する方向の繰返し水平応力を測定した。リングの円周方向のひずみは49kPaの水平圧が内面に加えられた時には約 1.0×10^{-4} で小さく、したがって、実験時でのリングの変形が水平応力の測定値に影響を与えないと判断した。

鉛直応力の大きさは供試体の表面において49kPaである。繰返しせん断応力は振動時の重錘、載荷板、リングおよび供試体に作用する慣性力によって生じる。

3. 試料および実験方法 試料として豊浦砂を用いた。その諸性質は次のとおりである。 $G_s=2.643$ 、 $D_{max}=0.84\text{mm}$ 、 $D_{so}=0.26\text{mm}$ 、 $U_c=2.1$ 、 $e_{max}=1.000$ 、 $e_{min}=0.660$

乾燥砂の実験方法は次のとおりである。まず、ゴムスリーブ内に気乾状態の砂を2層に分けて詰め、各層の表面はタンパーを用いて一様にしかも強く押しつけて密詰め供試体を作製した。この供試体の間隙比 e は0.72-0.74で、相対密度 D_r に換算して76.5-82.4%の範囲にあった。

次に、供試体の表面に重錘および載荷板をのせ、静的

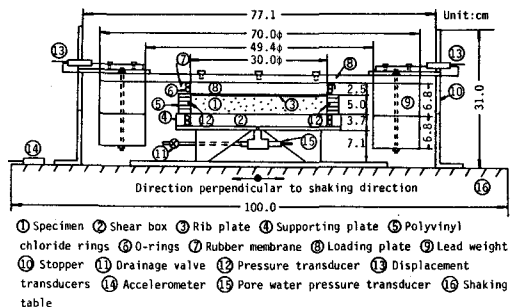


図-1 実験装置

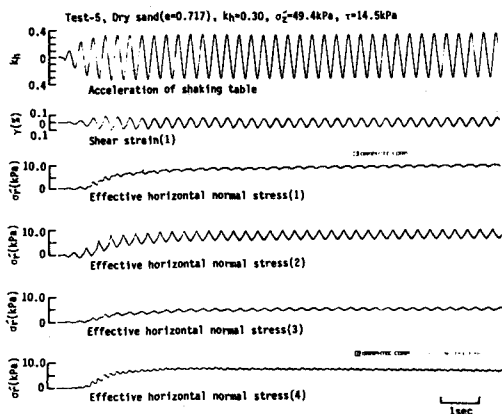


図-2 乾燥砂の実験記録の一例

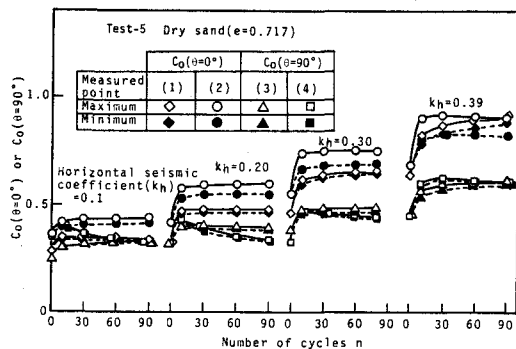


図-3 C_0 の n に伴う変化（乾燥砂）

な水平応力を測定した。その後、振動台を駆動し、供試体に振動数3Hzで水平震度 k_h が0.1の加速度を30秒間与えた後、振動台を停止し、供試体の沈下量を測定した。さらに $k_h=0.2, 0.3, 0.4$ にして同様の実験を行った。実験中には振動台の加速度、供試体に生じる繰返し水平応力、せん断変位振幅がそれぞれの変換器で測定され、すべてペン書きオシログラフに記録された。

飽和砂の実験はまず、ゴムスリーブ内にあらかじめ脱気水を満ちておき、その中に湿潤状態の砂を砂粒子間に気泡が入らないように注意して少量ずつ流し込んで2層に分けて詰め、乾燥砂の場合と同様に各層を締め固めて密詰め状態の飽和砂供試体を作製した。

次に、振動台を駆動し、排水バルブを閉じた状態で供試体に所要の加速度を与えて液状化実験を行った。実験中には乾燥砂の実験での測定量の他に間隙水圧が供試体底面の中央部で測定された。

4. 結果および考察 (1) 乾燥砂の地震時土圧係数 図-2は実験記録の一例(Test-5)を示す。測点(1)、(2)の水平応力 σ'_x は振動方向すなわち、せん断方向の水平応力を表し、測点(3)、(4)の σ'_x はせん断方向と直交する方向の水平応力を表す。記録からわかるように、各測点の σ'_x はせん断応力の繰返し回数 n が小さい間に急増し、その後は漸増するか一定となる。なお、この実験では測点(3)の σ'_x の波形には測点(4)の σ'_x の波形に見られる倍振動が生じていないが、ほとんどの実験では、せん断方向に直交する方向の測点(3)、(4)の σ'_x の波形には倍振動が生じた。また、測点(1)の σ'_x の値が波の山の値(最大値)となる時には測点(2)の σ'_x の値は谷の値(最小値)となる。以下の実験結果には、主にこのTest-5の結果を示した。

図-3は実験結果を式(1)で与えられる地震時土圧係数 C_o の最大値および最小値の n に伴う変化として各 k_h 毎に示したものである。 σ'_x は鉛直応力を表す。

$$C_o = \sigma'_x / \sigma'_z \quad (1)$$

図中の $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$ はそれぞれ水平応力がせん断方向およびそれと直交する方向で測定されたことを表す。

$C_o(\theta=0^\circ)$ はせん断変形が生じている方向の水平応力から求められた土圧係数であるが、著者らの地震時土圧の実験結果²⁾を参考にすると、図-4に示す程度のせん断ひずみを生じている砂層はほぼ主動状態にあると考えられるので、この土圧係数は物部・岡部式の地震時主動土圧係数に相当するものと考えられる。それに対して $C_o(\theta=90^\circ)$ はその方向の変形はないので、これは地震時土圧係数となる。

図-4、5はそれぞれ供試体のせん断ひずみ両振幅 γ_0 の n に伴う変化、 $n=90$ 回の時の γ_0 、体積圧縮率 v と k_h の関係を示す。図-3、4、5から $n=10-15$ 回の間では砂層のせん断変形量が大きく、そのために水平応力は増大するが、 n が増加するにしたがって砂層が次第に密になるために、そのせん断変形量が小さくなり、したがって、水平応力の n に伴う増加の割合が小さくなる。なお、Youd and Craven³⁾のノルウェー型の単純せん断試験機を用いた実験でも乾燥砂の C_o は n の小さい間に著しく増加するという結果が得られている。

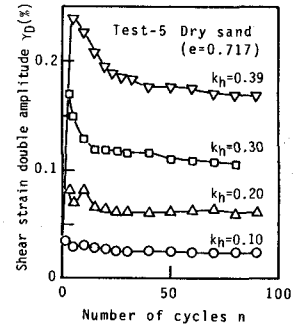


図-4 γ_0 の n に伴う変化 (乾燥砂)

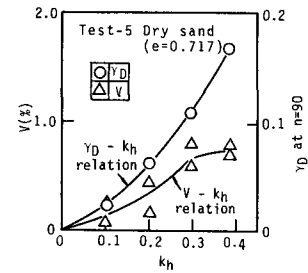


図-5 $n=90$ 回の時の γ_0 と v (乾燥砂)

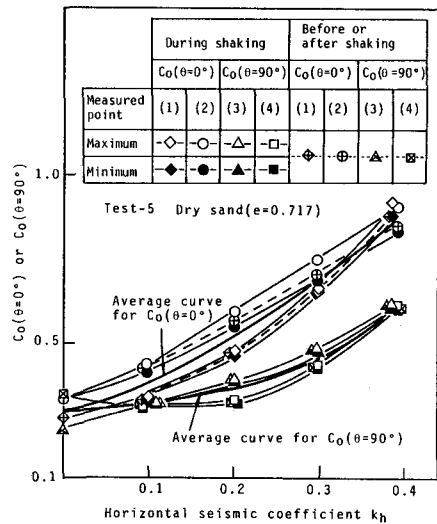


図-6 $C_o(\theta=0^\circ)$ 、 $C_o(\theta=90^\circ)$ と k_h の関係 (乾燥砂)

図-6は $n=90$ 回の時の $C_0(\theta=0^\circ)$ 、 $C_0(\theta=90^\circ)$ の最大値および最小値と k_n の関係を示す。図中の記号は図-3のものと同ようである。白ぬきの記号に(+)が入ったものは供試体が作製された時および振動が停止された時の静止土圧係数 K_0 値を表す。図-6からわかるように C_0 の最大値、最小値および繰返しせん断後の K_0 値は震度の増加に伴って増加し、また、測点測点(1)、(2)の $C_0(\theta=0^\circ)$ 値は測点(3)、(4)の $C_0(\theta=90^\circ)$ 値よりも大きい。

図-7は図-6中の太線で示す C_0 と k_n の平均値曲線を示す。この図から $k_n=0.4$ までの範囲においては $C_0(\theta=0^\circ)$ 値は $C_0(\theta=90^\circ)$ 値の1.2-1.5倍であることがわかる。また、 $C_0(\theta=0^\circ)$ 値は物部・岡部式の地震時主働土圧係数に比べて大きくなっているが、この原因は振動中に砂の内部摩擦角 ϕ' が減少するためである。物部・岡部の地震時主働土圧係数は三軸試験から得られた豊浦砂($e=0.72$ 場合)の $\phi'=46^\circ$ に対して求められた。なお、供試体が作製された時の初期の $K_0=0.30$ を、下記のJakyの式に代入して得られた ϕ' は 44.3° と求まった。

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (2)$$

図-8は図-7の C_0-k_n 曲線を用いてそれぞれの震度の繰返しせん断後に供試体に生じた水平応力から初期の水平応力を差し引いて得られた水平応力の増加量 $\Delta \sigma'_x$ と k_n の関係を示す。同図にはTest-3の結果も示す。これより $\Delta \sigma'_x$ は k_n にほぼ正比例すると見做し、両者の関係として $\Delta \sigma'_x(\theta=0^\circ)=53.9k_n$ 、 $\Delta \sigma'_x(\theta=90^\circ)=24.5k_n$ が得られ、 k_n による $\Delta \sigma'_x(\theta=0^\circ)$ の増加は $\Delta \sigma'_x(\theta=90^\circ)$ のその約2倍となることがわかった。この式の応力の単位はkPaである。

この結果を用い、さらに先の研究¹⁾と同様に供試体の円周面にはせん断応力は生じないと仮定すると、繰返しせん断時に供試体に生じる主応力は次式で示される。

$$\sigma'_1 = [(1 - K_0 - 53.9k_n / \sigma'_z) \cdot \sigma'_z + \tau^2] / (1 - K_0 - 53.9k_n / \sigma'_z) \cdot \sigma'_z$$

$$\sigma'_2 = (K_0 + 24.5k_n / \sigma'_z) \cdot \sigma'_z, \quad \sigma'_3 = (K_0 + 53.9k_n / \sigma'_z) \cdot \sigma'_z \quad (3)$$

式(4)を用いて主応力比で定義した地震時土圧係数 C'_0 を求めた。その結果は図-7(点線)に示す。せん断変形が生じない方向の $C'_0(\theta=90^\circ)$ が地震時土圧係数に相当すると考えられる。

$$C'_0(\theta=0^\circ) = \sigma'_3 / \sigma'_1, \quad C'_0(\theta=90^\circ) = \sigma'_2 / \sigma'_1 \quad (4)$$

図-9は図-7の $C'_0(\theta=90^\circ)$ 値をJakyの式に代入して得られた ϕ' と k_n の関係を示す。 $k_n=0.4$ の値を除くと、 $\phi'(\theta=90^\circ)$ 値は k_n が0.1増加する毎に2.5度減少することがわかる。これと同じ結果は著者の地震時土圧の実験²⁾においても、すでに得ており、その点でも興味のある結果である。

(2) 液状化過程の地震時土圧係数 図-10は飽和砂供試体の実験記録の一例(Test-19)を示す。この実験は $k_n=0.23$ で行われ、 $n_c=37$ 回の時に供試体は液状化した。 n_c は液状化を生じるまでの繰返し回数である。記録からわかるように、この実験では密詰めの砂($Dr=77.1\%$)が用いられたので、液状化時の水平応力 σ'_x はCyclic mobilityの影響を受けて、その振幅はかなり大きくなっている。

図-11はTest-19の実験から得られた C_0 値の n に伴う変化を示す。同図には間隙水圧の上昇曲線も一緒に示されている。図からわかるように、飽和砂においても乾燥砂の場合と同様に $C_0(\theta=0^\circ)$ 値は $C_0(\theta=90^\circ)$

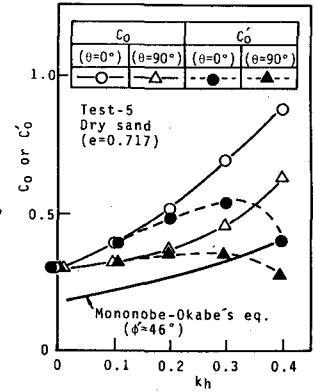


図-7 C_0 と C'_0 の比較 (乾燥砂)

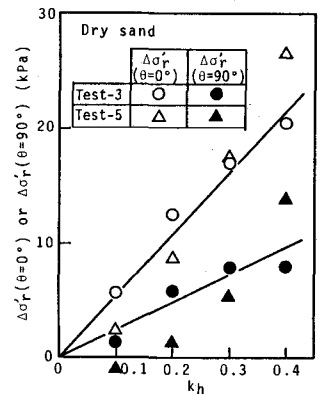


図-8 震度に伴う水平応力の増加量 (乾燥砂)

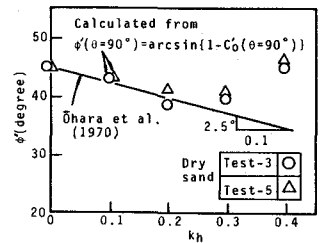


図-9 ϕ' の k_n に伴う変化 (乾燥砂)

値よりも大きい。また、飽和砂でも乾燥砂と同様に C_0 値は n が小さい間にやや増加し、その後は液状化が生じるまではほぼ一定値となる。

図-12はTest-19の2つの測点での C_0 ($\theta=0^\circ$) および C_0 ($\theta=90^\circ$) の最大値の平均値を求め、それらと n との関係を示す。同図には C'_0 値も示す。図から飽和砂においても乾燥砂と同様に C_0 ($\theta=0^\circ$)、 C'_0 ($\theta=0^\circ$) の値はそれぞれ C_0 ($\theta=90^\circ$)、 C'_0 ($\theta=90^\circ$) 値よりも大きいことがわかる。

5. 結論 本研究によって得られた結論は次のとおりである。

1) 乾燥砂の地震時土圧係数 C_0 、 C'_0 はせん断応力の加えはじめからその繰返し回数(n)=10-15回までの間に著しく増加するが、その後はほぼ一定値となる。また、 C_0 、 C'_0 値とも k_n の増加に伴って大きくなる。

2) 乾燥砂の地震時主働土圧係数に相当するせん断方向の C_0 ($\theta=0^\circ$)、 C'_0 ($\theta=0^\circ$) 値はそれと直交する方向の地震時土圧係数 C_0 ($\theta=90^\circ$)、 C'_0 ($\theta=90^\circ$) よりも大きい。

3) 繰返しせん断時の乾燥砂の水平応力の増加量 $\Delta\sigma'_x$ と k_n の関係は $\Delta\sigma'_x$ ($\theta=0^\circ$) =53.9 k_n 、 $\Delta\sigma'_x$ ($\theta=90^\circ$) =24.5 k_n という式によって近似することができた。

4) 地震時の乾燥砂の内部摩擦角 ϕ' ($\theta=90^\circ$) は k_n が0.1増加する毎に2.5度小さくなる。

5) 乾燥砂の結果と同様に、飽和砂においても液状化に至る過程では、 C_0 、 C'_0 値は n が小さい間に増加し、その後はほぼ一定となる。また、乾燥砂の場合と同様に、 C_0 ($\theta=0^\circ$)、 C'_0 ($\theta=0^\circ$) 値はそれぞれ C_0 ($\theta=90^\circ$)、 C'_0 ($\theta=90^\circ$) 値よりも大きい。

6) C'_0 ($\theta=90^\circ$) は地震時土圧係数に相当する。

最後に本実験を行うに当っては山口大学工学部松田 博助教授から有益な御助言を頂き、また、同学部学生松岡充宏ならびに斉藤光輝両君には実験、結果の整理を手伝って頂いた。ここに記してこれらの方々に厚く謝意を表します。

参考文献 1) 大原資生・山本哲朗：砂の液状化を生じる減衰振動波と定常振動波の相関性、土と基礎、Vol.36、No.12、pp.31-36、1988
2) 大原資生・前原 博・永田洋文：地震時主働土圧について、土と基礎、Vol.18、No.2、pp.27-35、1970 3) Youd, T.L. and Craven, T.N.: Lateral Stress in Sands during Cyclic Loading, Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol.101, No. GT2, pp.217-221, 1975 4) 大原資生・松田 博：飽和粘土の動的強度について、土木学会論文報告集、第274号、pp.69-78、1978

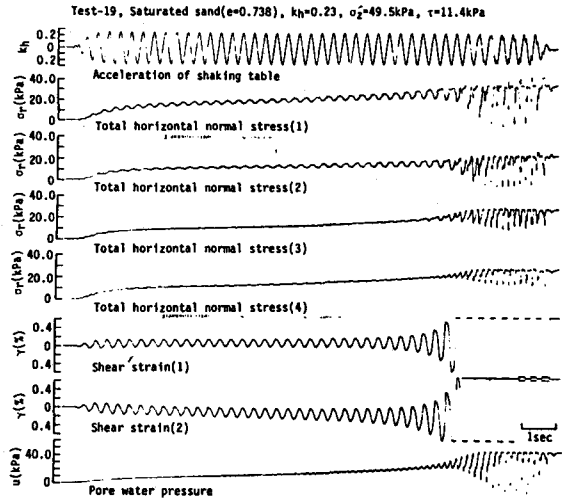


図-10 飽和砂の液状化実験記録の一例

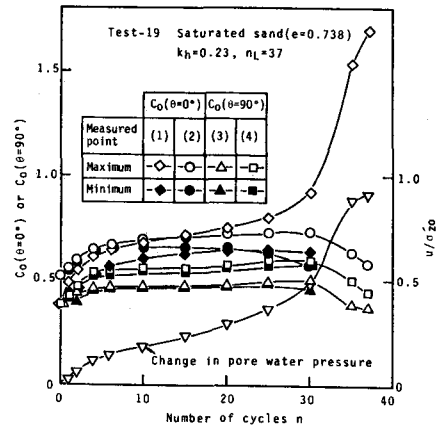


図-11 C_0 ($\theta=0^\circ$)、 C_0 ($\theta=90^\circ$) の n に伴う変化 (飽和砂)

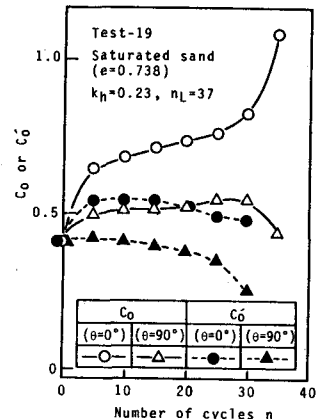


図-12 C_0 、 C'_0 の n に伴う変化 (飽和砂)