

異方圧密飽和粘性土の動的強度について

DYNAMIC SHEAR STRENGTH OF ANISOTROPICALLY CONSOLIDATED SATURATED CLAY

大原 資生*・山本 哲朗**・小串 利勝***
By Sukeo OHARA, Tetsurō YAMAMOTO and Toshikatsu OGUSHI

1. 緒言

軟弱地盤上に設けられた構造物の基礎や土構造物の耐震性を検討する場合には、それを構成する土の動的強度を知る必要がある。

近年、飽和土の動的特性や強度予測に関する研究報告が多くなされているが、ほとんどの場合、 K_0 圧密供試体あるいは過圧密供試体を使用しての動的単純せん断試験か等方圧密供試体を使用しての動的三軸試験によりなされたものである。

したがって、土の強度異方性に大きく起因すると考えられる静止土圧係数 (K_0 値) が飽和土の動的強度にどのような影響を及ぼすのかはっきり把握できない。

飽和砂の液状化に関するこうした実験は、石原ら¹⁾、龍岡ら²⁾によってなされているが、飽和粘性土に関する報告例はない。

そこで、著者らは、本研究室で従来から使用されている動的単純せん断試験機に新たにセル室を設け、等方あるいは異方圧密供試体を作製し、応力制御方式による非排水せん断試験を行った。

以下、実験方法、結果およびその考察について述べる。

2. 実験装置および方法

今回の実験に用いた動的単純せん断試験機のセル室(せん断箱等を含む)付近を図-1および写真-1に示した。

せん断箱は、Kjellman型で、供試体は直径 75 mm、厚さ約 20 mm の円板状でゴムスリーブに包まれ、周囲

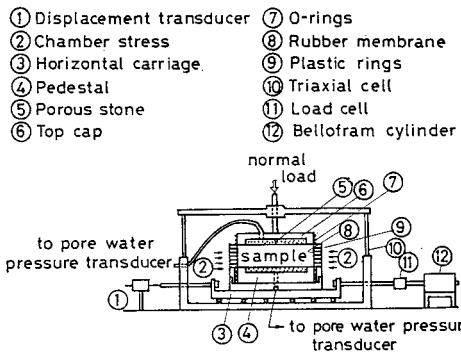


図-1 実験装置

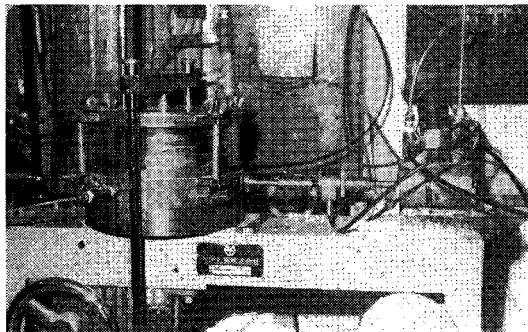


写真-1 実験装置(セル室付近)

に内径 75.2 mm、外径 96.0 mm、厚み 2 mm のプラスチックリングが 14~17 枚積み重ねられており、鉛直圧載荷等による供試体の側方膨れ出しを防止し、さらに供試体のせん断変形を妨げないようになっている。

従来の装置と異なる点は、図-1 に示すようにこのせん断箱を内径 205 mm、外径 235 mm、高さ 170 mm のセル内に設けたことであり、これにより異方および等方圧密供試体の作製が可能となったことである。

図-2(a) は、正弦波線返せん断力負荷装置の概略を示している。

この装置は、復動式のベロフラムシリンダー、ソレノ

* 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 山口大学講師 工業短期大学部土木工学科

*** 学生会員 山口大学大学院工学研究科(現・(株)建設技術研究所)

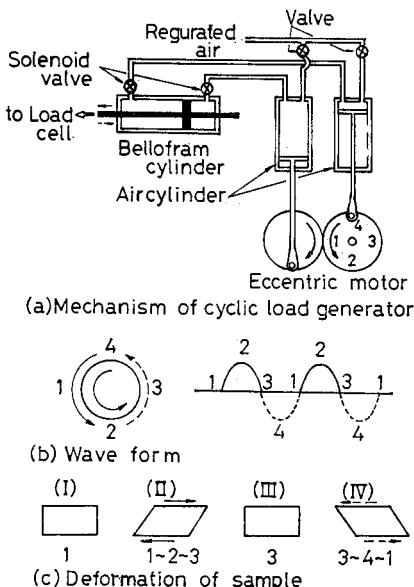


図-2 せん断力負荷機構と波形

イドバルブ、2個のエアーシリンダー、2組の偏心円板と空気調圧装置より構成されている。

まず最初に、ピストンの位置をいずれのシリンダーでも中央に置く。その状態でバルブ、ソレノイドバルブを開けて調圧空気をシリンダー内に送り込み、すべての空気室の空気圧を等しくした後、バルブ、ソレノイドバルブを閉じる。次に、偏心円板を回転させることによって、エアーシリンダーの2つの圧力室の圧力が交番的に、また正弦的に変化するので、ベロフラムシリンダーのピストンロッドに正弦的な押し引きの力が発生し、供試体に正弦波状の繰返せん断力が負荷される。

本実験では、偏心円板の回転周期を2秒とした。

図-2(b)は、そのせん断波形を示し、図-2(c)は、そのときの供試体のせん断変形の様子を示したものであり、図中の1, 2, 3, 4の各番号は偏心軸の位置の番号に対応する。

なお、せん断箱等がセル室内に設けられているため、ロッドとセルとの接触部の摩擦とかその他の構造上の摩擦を完全に取り除くことができないので、試料として水を用い、鉛直圧を負荷してあらかじめ摩擦検定を行い、測定値を補正した。

試験中のせん断応力、せん断ひずみ、過剰間隙水圧は、それぞれ、ロードセル(図-1⑪)、差動トランス型変位計(同①)、圧力変換器を用いて測定し、ペンオシログラフに記録した。

過剰間隙水圧の測定は、上部および下部からポーラスストーンを通じてビニール管で同一の間隙水圧計に連結して行った。

3. 試料および供試体作製方法

本実験で用いた試料は、粉末状のカオリーン粘土(比重 $G_s = 2.685$ 、液性限界 $W_L = 38.6\%$ 、塑性限界 $W_P = 24.6\%$)である。この気乾状態の粘土粉末に含水比が58%になるように脱気水を加え、よく練り合わせた後、水分の蒸発を防ぎながら1昼夜放置する。

その後十分に脱気を行い、試料内に気泡のないことを確認したうえ(この状態の飽和度は約97%以上)、前述のせん断箱のゴムスリーブの中に、1層ごと突き棒で約 0.05 kgf/cm^2 ($= 4.9 \text{ kPa}$)の力で突き固めながら、3層に分けて詰め、両面排水状態で所定の鉛直圧のみにより、1.5時間圧密する。

次に、トップキャップ(図-1⑥)にO-リング(同⑦)によりゴムスリーブを密着させ、さらに金属バンドで固定する。そしてセル(同⑩)をセットした後、鉛直圧を変えずに、初期有効拘束圧比 $K_c = (\sigma_h / \sigma_v)$ が、所定の値(0.5, 0.7, 1.0)となるように、セル室内に圧縮空気を送り込み側圧を負荷し、21.5時間、異方あるいは等方圧密を行う。圧密終了後、空気抜きを行い、間隙水をいきわたらせるために、間隙水圧計を用い、鉛直圧に等しいバックプレッシャーを数秒間加え、その値が定常となったのを確認したのち、バックプレッシャーを0に戻した。

また、実験に先立って、この粘土の K_0 圧密試料を用いて三軸圧縮試験を行い、内部摩擦角(ϕ')を求めた。Brookerの式($K_0 = 0.95 - \sin \phi'$)を用い、この粘土の K_0 値が0.36と判明したので、最初に負荷した鉛直圧の0.36倍以上の側圧を負荷することにして、今回の初期有効拘束圧比を定めた。

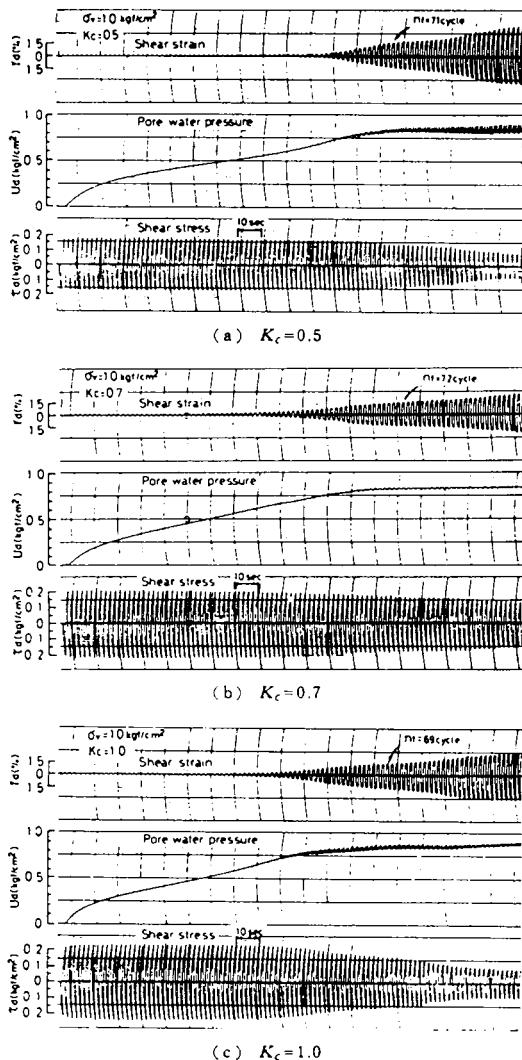
4. 実験結果および考察

図-3は、鉛直圧 $\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($= 98 \text{ kPa}$)の実験記録の例であり、(a), (b), (c)はおのおの初期有効拘束圧比 K_c が0.5, 0.7, 1.0のものである。

図中の記録線は、上から順にせん断ひずみ、間隙水圧、せん断応力の変化を示す。

この図より、せん断応力を繰り返し負荷すると、過剰間隙水圧が蓄積し、ある回数に達するとせん断ひずみが急増し始め、やがて破壊に至ることがわかる。これは、飽和砂の液状化とよく似ており、粘性土も、せん断力を繰り返し載荷することにより一種の液状化、すなわち軟化することを示唆している。

これが、いわゆる繰返し効果とよばれるものである³⁾。しかし、初期有効拘束圧比 K_c の値が異なるにもかか

図-3 実験記録例 ($1 \text{kgf/cm}^2 = 98 \text{kPa}$)

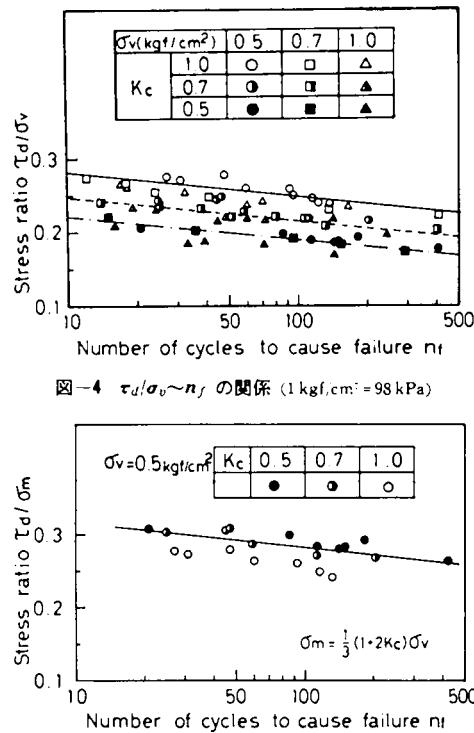
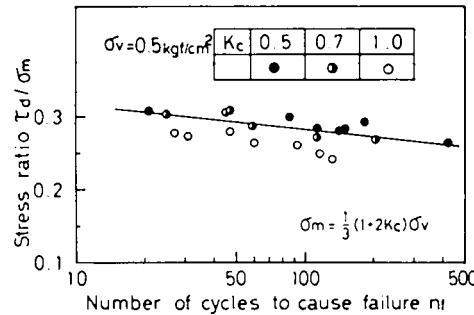
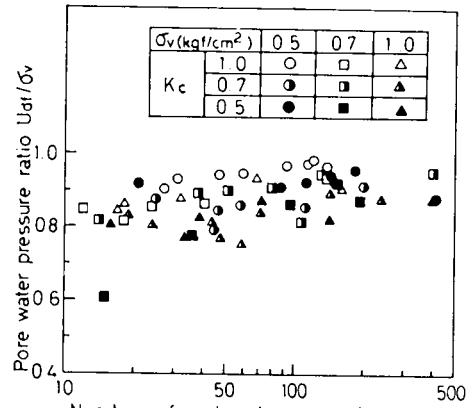
わらず、せん断ひずみ、過剰間隙水圧の変化の傾向には違いがみられない。

なお、われわれの実験室では、従来から破壊の定義をせん断ひずみが片振幅で 15% となる点と定めているので、今回もそれにならって結果を整理した。

図-4 に、繰返せん断応力 (τ_d) の初期有効鉛直応力 (σ_v) に対する比 τ_d/σ_v と繰返し回数 (n_f) との関係を示した。

σ_v の違いにより多少のばらつきはあるが n_f の増加に伴い τ_d/σ_v は低下しており、 τ_d/σ_v と n_f との関係は、 K_c ごとにほぼ 1 本の直線で表わすことができる。

次に、図-5 は、 σ_v が 0.5kgf/cm^2 (49kPa) に関する、 τ_d を初期有効平均主応力 (σ_m) で除した τ_d/σ_m と n_f の関係を示したものであり、これより、 τ_d/σ_m と n_f の関係には、 K_c による差はほとんどみられない。すな

図-4 $\tau_d/\sigma_v \sim n_f$ の関係 ($1 \text{kgf/cm}^2 = 98 \text{kPa}$)図-5 $\tau_d/\sigma_m \sim n_f$ の関係 ($1 \text{kgf/cm}^2 = 98 \text{kPa}$)図-6 $U_{dfs}/\sigma_v \sim n_f$ の関係 ($1 \text{kgf/cm}^2 = 98 \text{kPa}$)

わち、飽和粘性土の動的強度は、初期有効平均主応力に比例すると考えられる。これは、石原らが飽和砂で行った実験結果と共通するものであり、大変興味深い。

図-6 は、破壊時の間隙水圧比 (U_{dfs}/σ_v) と n_f との関係を示したものである。

1 つの K_c に注目すると、 n_f が増加すると過剰間隙水圧の発生量が多くなっている傾向がうかがえるが、 U_{dfs}/σ_v と n_f との関係には K_c の値はあまり関与していないと考えられる。

そこで、 K_c の増加に伴う応力比 (τ_d/σ_v) の増大が何に起因するのかを調べるために、 K_c および σ_v をパラ

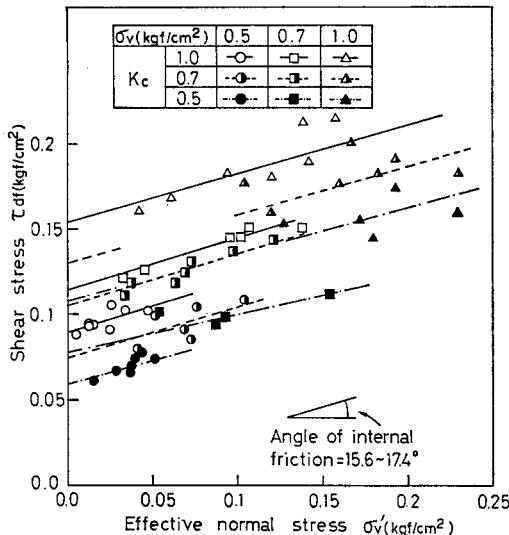


図-7 動的単純せん断試験による破壊線（ボショロフ規準による）
(1 kgf/cm²=98 kPa)

メーターにして、破壊時の動的せん断応力 (τ_{dsf}) と有効鉛直圧 (σ_v') の関係を示したのが、図-7である。図から、 τ_{dsf} と σ_v' の関係は 1 本の直線で表わされる。この直線は、ボショロフの破壊規準から求めた破壊線と考えられる⁴⁾。

そこで、破壊線を次式のように表わし、見掛けの粘着力 (c_{sd}') と内部摩擦角 (ϕ_{sd}') を求めた。

$$\tau_{dsf} = c_{sd}' + \sigma_v' \tan \phi_{sd}'$$

その結果、 ϕ_{sd}' は $15.6\text{ }^{\circ}\text{ }-\text{ }17.4\text{ }^{\circ}$ であり、 σ_v や K_c の値によりあまり変化しないが、 c_{sd}' は σ_v の増加に伴い、また K_c の値の増加に伴い大きいことがわかる。

図-8 は、この c_{sd}' を σ_v あるいは σ_m で正規化した c_{sd}'/σ_v (c_{sd}'/σ_m) と K_c の関係を示したものである。

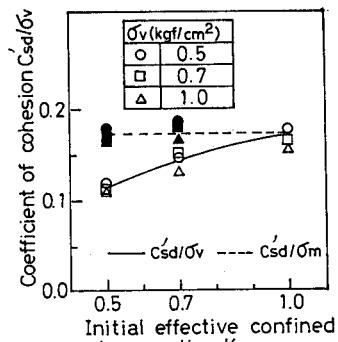


図-8 c_{sd}'/σ_v (c_{sd}'/σ_m)～ K_c の関係
(1 kgf/cm²=98 kPa)

各 K_c の値に注目すると、●、■、▲（また ○、□、△）印になるにつれて、つまり、 σ_v が 0.5, 0.7, 1.0 と大きくなるにつれて、 c_{sd}'/σ_v (c_{sd}'/σ_m) の値は、若干小さくなっているが、その減少の量は小さく、 K_c が変化してもその減少量にあまり変化がみられないが、ある σ_v の値のみに注目すると、 c_{sd}'/σ_v は、 K_c の増加に伴い大きくなっている。しかし、 c_{sd}'/σ_m は、 K_c の変化によらずほぼ一定である。

これらのことから、 K_c が増加すると平均主応力が増加するために、粘性土では、見掛けの粘着力が増大することがわかる。

また、これは、図-4 と図-5 の関係を裏付けてい

5. 結 語

飽和粘性土の動的強度に及ぼす初期有効拘束圧比 (K_c) の影響を調べる目的で、異方、等方圧密供試体を作製して、非排水の動的単純せん断試験を行った結果、次のことが明らかとなった。

(1) 破壊時の間隙水圧比 (u_{dsf}/σ_v) と n_f との関係には、 K_c の変化による影響は、ほとんどない。

(2) 飽和粘性土も飽和砂と同様に、 $\tau_d/\sigma_v \sim n_f$ の関係は K_c の増大により大きくなるが、 $\tau_d/\sigma_m \sim n_f$ の関係は、 K_c の変化によらずほぼ一定である。すなわち、飽和粘性土の動的強度も、平均主応力に比例すると考えられる。

(3) 粘性土では、 K_c が増大すると、内部摩擦角は変化しないが、見掛けの粘着力が増大する。

(4) K_c の増大に伴う粘性土の動的強度増加は、平均主応力の増大に伴う粘着力の増加に起因するものと考えられる。

最後に、本実験を行うにあたって、本学学生、三井欣二君の助力をいただいた。厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Ishihara, K., S. Iwamoto, S. Yasuda and H. Takatsu: Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 261～264, 1977.
- 2) 龍岡文夫：振動三軸試験と動的単純せん断試験による砂の液状化強度、第 15 回土質工学研究発表会講演集、pp. 569～572, 1980.
- 3) 石原研而：土質動力学の基礎、鹿島出版会、1976。
- 4) 最上武雄：土質力学、土木学会監修、技報堂、pp. 524～583, 1969.

(1981.5.29・受付)