

連続的な静的載荷と繰返し載荷を同時に受ける飽和砂の 非排水せん断特性

UNDRAINED BEHAVIOR OF SATURATED SAND SUBJECTED TO SIMULTANEOUS MONOTONIC AND CYCLIC LOADING

松澤 宏*・杉村昌広**・坂本 悟***

By Hiroshi MATSUZAWA, Masahiro SUGIMURA and Satoru SAKAMOTO

Simultaneous monotonic and cyclic loading may be applied to a soil element near, for example, retaining structures during earthquakes. To study into the behavior of saturated sand in such a case as above, a series of undrained triaxial tests were performed by applying cyclic stresses to a specimen which is subjected to continuous monotonic loading at a constant axial strain rate simultaneously. It was found that the behavior of sand in these tests was different from those in other types of cyclic loading tests in which cyclic stresses are fully or partially reversed or not reversed between the triaxial compression and extension conditions.

Furthermore, a sort of interaction effect of cyclic and monotonic loading on the liquefaction was observed, of which the tendency depended on the density of specimen.

Keywords: undrained shear, liquefaction, cyclic loading, monotonic loading, saturated sand, triaxial test

1. ま え が き

地盤または地盤-構造物系の地震時挙動を調べるための土の動的物性値は、原位置試験または室内における繰返しせん断試験などによって求めている。後者については、繰返し三軸試験、繰返しねじりせん断試験などがよく行われ、飽和砂質地盤の液状化抵抗、動的せん断弾性係数および減衰定数、動的強度などが研究および実務の対象とされる。これらの試験における供試体への載荷は、「両振りせん断」あるいは「片振りせん断」によっているのが一般的である。Fig. 1は原地盤における土の要素と、それらの地震時の応力状態を模擬した室内試験での載荷方式を示したものである。図中、 τ はせん断応力、 p' は有効平均応力であり、 p'_0 は初期有効平均応力である。「両振りせん断」および「片振りせん断」は、Fig. 1における水平地盤、傾斜地盤および構造物近傍(I)それぞれの欄に示した要素AおよびBの地震時応力状態を模擬したものであり、供試体には図のCase-1およびCase-2に示したようなせん断応力が平均応力一定の条

件下で与えられる。

しかるに、図中の構造物近傍(II)欄に示すような傾斜地盤上の構造物近傍、土留め構造物近傍の要素C、Dが地震時に受ける応力は「両振りせん断」または「片振りせん断」に限られるという保障はない。構造物近傍(II)欄に示す構造物は、地震時に構造物自体に作用する地震力や地震時土圧によって、一方向に連続的な累積変位を生じると考えられる。このような場合、壁体近傍の土の要素は、地震動による動的載荷と同時に、壁体の変位によって、平均応力やせん断応力レベルの変化を伴いながら一方向へ卓越した変形を受けるような載荷状態になる。

たとえば、構造物近傍(II)欄に示す要素Dのように、土留め構造物前面の地盤では、地盤に対して矢板壁が受働側へ累積的な相対変位をするのに伴って、壁体に作用する地震時土圧は振動しながら、その平均値が常時の土圧状態から変化していくような応力状態になる。さらに、このような土圧の変化により、地盤内の平均応力およびせん断応力レベルも変化する。したがって、要素C、Dは平均応力が増大あるいは減少しながら、Case-3に示す平均せん断応力比または累積ひずみが増大するような形で、液状化またはせん断破壊に至る可能性が考えられる。「片振りせん断」の場合にも一方向への累積変形が

* 正会員 工博 名古屋大学助教授
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工修 名古屋大学助手(同上)

*** 正会員 工修 戸田建設名古屋支店(元・名古屋大学大学院生)

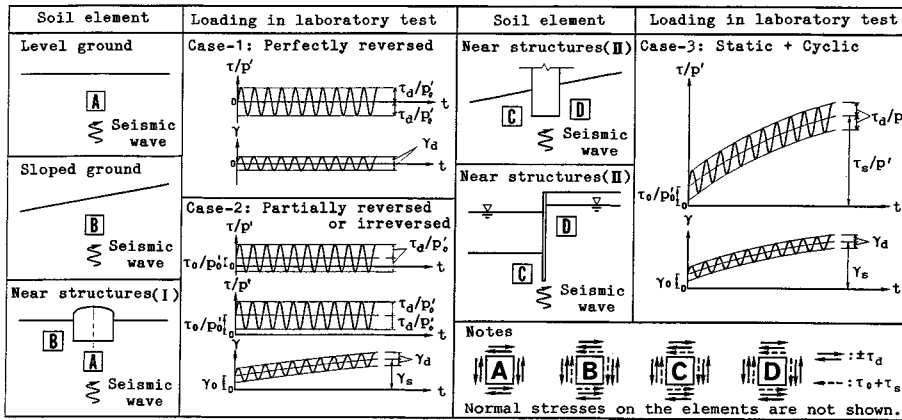


Fig. 1 Illustrative figure of site conditions and corresponding laboratory tests.

生じるが、これは地震力を受けた地盤の物性を反映して生じるものであり、要素 C, D のように構造物からの入力として累積変形が与えられるものとは異なる。しかしながら、要素 C, D に対して、「両振りせん断」や「片振りせん断」のような平均応力一定の繰返しせん断特性が適用可能であるかどうかについては、検証されていない。

現行の耐震設計基準等で提案されている液化判定方法は、構造物のない水平地盤を対象としたものが主流となっている。これに対して「建築基礎構造設計指針」¹⁾では、実際は構造物のある場合が問題であり、現在の判定方法は大きな目安値を与えるものにすぎないことが指摘されており、構造物のある地盤における非排水せん断特性の検討の必要性を示唆するものであると考える。

Fig. 1 の Case-3 のような繰返し載荷については、供試体への静的載荷を段階的に行い、各段階において繰返しせん断を与える試験法も考えられるが、供試体に静的載荷を連続的に与えたときの土の動的性質に関する研究例は、ほとんどみられない。以下では、このような載荷を「静的+繰返しせん断」と称している。

本研究は、この「静的+繰返しせん断」を受ける飽和砂の非排水せん断挙動を扱ったものであり、「静的+繰返しせん断」時の非排水せん断挙動の特徴を「両振りせん断」や「片振りせん断」での挙動との比較を通して明らかにすることを目的としている。

飽和砂の液化化に関する最近の研究からは、初期せん断応力を受ける飽和砂の非排水破壊に関して、過剰間隙水圧の蓄積による液化化破壊または液化化に至らなくとも有効応力の減少に伴って生じるせん断破壊の 2 つの可能性が指摘されている²⁾。

繰返しせん断を受ける飽和砂の非排水変形・強度特性あるいは液化化特性に影響を及ぼす種々の因子が従来より指摘されているが³⁾、「静的+繰返しせん断」ではさ

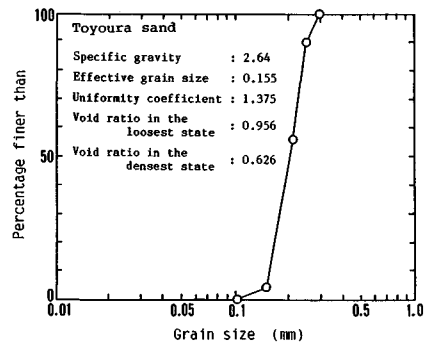


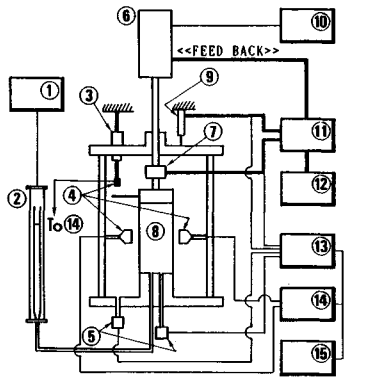
Fig. 2 Physical properties of Toyoura sand.

らに、同時に負荷される静的載荷による砂のダイレイタンスー効果、繰返し載荷速度（周波数）に対する静的載荷速度の割合などが新たな因子として考えられる。しかし、これらの影響についてはほとんどわかっていない。

本研究では、「静的+繰返しせん断」状態での非排水せん断特性を明らかにするための第 1 段階として、これらの新たな因子のうち、繰返し載荷の周波数および静的載荷速度については、それぞれ 0.2 Hz および 2.82 %/min の場合について重点をおいて検討を行っている。

2. 飽和砂の非排水「静的+繰返しせん断」試験 (DCU-test)

試験に用いた試料は豊浦砂であり、その粒径加積曲線と物理定数は、Fig. 2 のとおりである。供試体（直径 50 mm、高さ 125 mm）は、気乾豊浦砂を空中落下法により所定の密度で成形し、その後側圧 19.6 kPa、背圧 9.8 kPa で CO₂ 置換および脱気水の注水を行って、飽和供試体を作成した。Skempton の間隙水圧係数 *B* は、背圧 196 kPa で 0.98 以上であった。試験装置の概略は Fig. 3 に示すとおりであるが、供試体への静的載荷はセルのジャッキアップにより与え、繰返し載荷はセル上方



①Back pressure cell ②Burrlete ③Small displacement measuring equipment ④Uncontact displacement sensors ⑤Pressure transducer ⑥Actuator ⑦Load cell ⑧Specimen ⑨Strain gauge type displacement transducer ⑩High house pressure ⑪Axial loading pressure controller ⑫Loading rate controller ⑬Strain Amplifiers ⑭Displacement transducers ⑮Personal computer

Fig. 3 Dynamic triaxial testing apparatus.

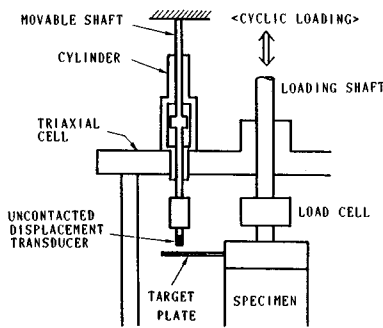


Fig. 4 Small displacement transducer.

のアクチュエータにより与えている。供試体軸方向の静的変形はセルの上昇量に等しいとして、Fig. 3 に示したひずみゲージ式変位計により測定し、繰返し載荷による微小変形は、セルの上蓋に取り付けた微小変位検出器の可動軸先端に固定した非接触型変位計により検出した。微小変位検出器は今回試作したものであり、これはFig. 4 に示すように軸受け部と可動軸からなり、セル内圧が可動軸に及ぼす揚圧力の反力は架台の不動点から取っている。Fig. 5 は、「静的+繰返しせん断」における供試体軸ひずみの測定例である。

本研究では、非排水状態での「静的+繰返しせん断」試験のほか、比較のために「両振りせん断」試験および「片振りせん断」試験を実施し、併せて試験装置の性能および試験方法の妥当性の検証を行った。載荷は、「両振りせん断」試験では等方圧密状態から、「片振りせん断」試験では等方圧密後、排水状態で所定の初期せん断応力に対応する軸差応力を与えて異方圧密した状態から、一定振幅の繰返し応力（周波数 0.2 Hz）を軸方向に作用させた。「静的+繰返しせん断」試験の場合には、静的

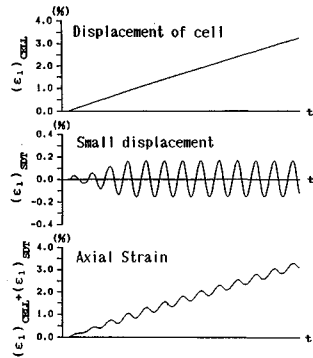


Fig. 5 Measurement of axial strain by using small displacement transducer.

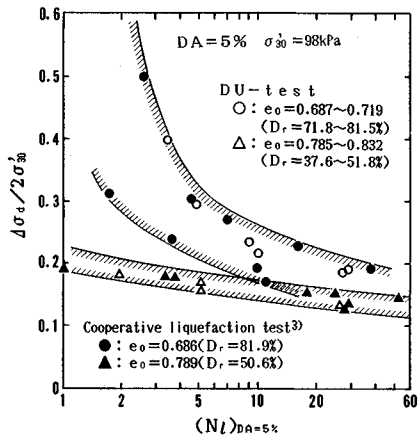


Fig. 6 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ versus $(N_f)_{DA=5\%}$ in DU-test.

破壊ひずみに達するまでにほぼ 30 波の繰返し載荷が作用すると考えて、等方圧密状態から、軸方向に一定速度の静的圧縮ひずみ（軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1 = 2.82 \text{ \%}/\text{min}$ ）と一定振幅の繰返し応力（周波数 $f = 0.2 \text{ Hz}$ ）を同時に作用させた。また、緩詰め砂については比較のために、 $\dot{\epsilon}_1 = 2.82 \text{ \%}/\text{min}$, $f = 0.1 \text{ Hz}$ での試験も行っている。なお、これらの載荷条件での「静的+繰返しせん断」試験において生じた最大軸ひずみ速度の絶対値は、 $5 \text{ \%}/\text{min}$ 程度であったが、非排水静的圧縮試験（SCU-test）を行って、軸ひずみ速度が $0.1 \sim 5.0 \text{ \%}/\text{min}$ の範囲では、間隙水圧変化に及ぼす載荷速度の影響は無視し得ることを確認している。

今回行ったいずれの試験においても、繰返し載荷の開始は圧縮側とした。

3. 結果および考察

(1) 両振りおよび片振りせん断試験結果

Fig. 6 は、「両振りせん断」試験（DU-test）において軸ひずみの両振幅 DA が 5 \% となったときの、繰返し

せん断応力比 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ ($\Delta\sigma_d$:軸方向繰返し応力片振幅, σ'_{30} :初期有効拘束圧)と繰返し載荷回数 $(N_t)_{DA=5\%}$ の関係である。図には、土質工学会により実施された共通液状化試験³⁾から得られたデータのうち、本研究での供試体寸法に近い直径 50 mm, 高さ 100 mm, 125 mm の供試体でのデータ (●印および▲印)とその範囲を示した。この図より、本研究で行った「両振りせん断」試

験の結果は共通液状化試験によるものと大差なく、妥当なものとする。

Fig. 7 に、「片振りせん断」試験 (DTU-test) における、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と $(N_t)_{DA=2\%}$ の関係を示す。動的三軸試験による豊浦砂の非排水「片振りせん断」試験の報告例は少ないが、図には兵動ら⁵⁾による試験結果を示してある。なお、兵動らのデータとの比較のために、Fig. 7 には $DA=2\%$ における結果が示してある。初期せん断応力の設定値等に違いがあるため直接的な比較はできないが、全体の傾向をみると、著者らの結果と兵動らのものは大差がない。

(2) 「静的+繰返しせん断」における非排水挙動

「静的+繰返しせん断」における非排水せん断挙動は、砂の初期密度およびせん断応力振幅に依存するが、以下の3つの様相に大別された。

- ① 完全液状化が発生し、強度を失う場合
- ② 初期液状化が発生するが、部分液状化を継続し、その後強度を回復して、せん断破壊に至る場合
- ③ 液状化を起こさずに、せん断破壊に至る場合。

上記のうち、①は初期間隙比 e_0 が 0.76 程度以上 (D_r は 60% 程度以下)、②は上記間隙比以下の砂にみられた現象である。また③は、初期間隙比によらず、繰返しせん断応力振幅が小さくせん断応力の作用方向の反転が生じない場合にみられた現象である。ただし、②のような液状化後の強度回復は、供試体の要素性が失われた後の現象である可能性もあり、これについてはさらに検討を要する。3つの様相それぞれについて、供試体の軸ひずみ ϵ_1 、軸差応力 $\sigma_1-\sigma_3$ および過剰間隙水圧 u の時間的な変化の例を Fig. 8(a)~(c) に、有効応力経路を Fig. 9(a)~(c) に示す。ただし、Fig. 9(b) は強度回復前と強度回復時に分けて示してある。

Fig. 8(a) と Fig. 9(a) は、 $e_0=0.759$ ($D_r=59.7\%$)、 $\sigma'_{30}=98\text{ kPa}$ 、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}=0.25$ で「静的+繰返しせん断」を与えたものであるが、繰返し載荷回数 N が 2~3 で初

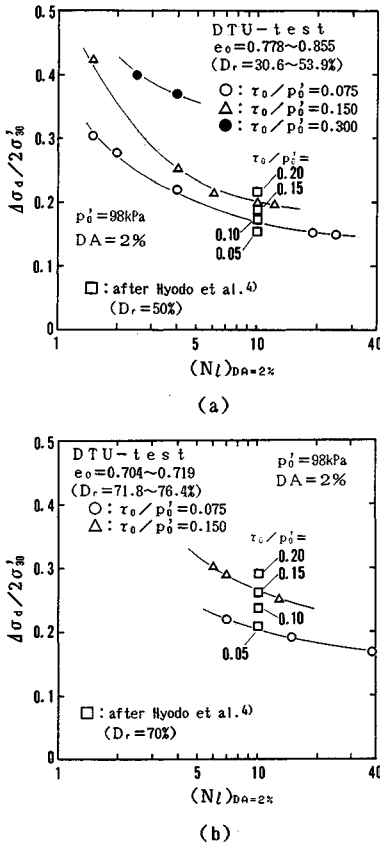


Fig. 7 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ versus $(N_t)_{DA=2\%}$ in DTU-test.

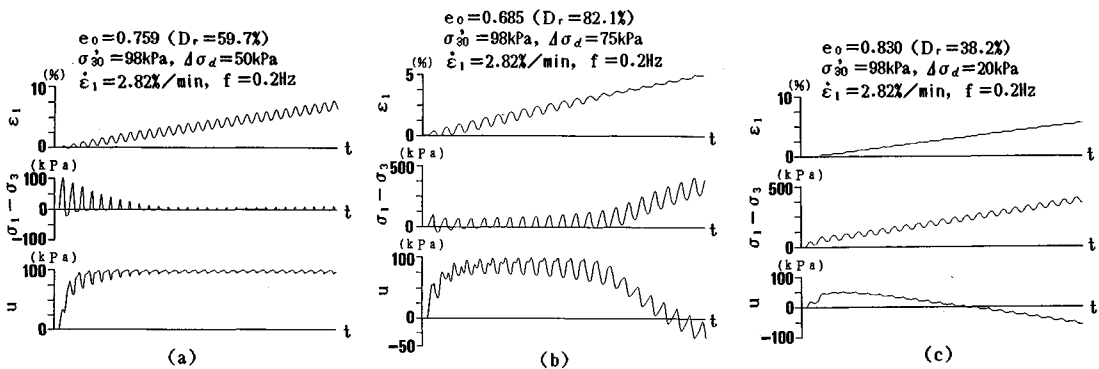


Fig. 8 Time histories of ϵ_1 , $\sigma_1-\sigma_3$ and u in DCU-test.

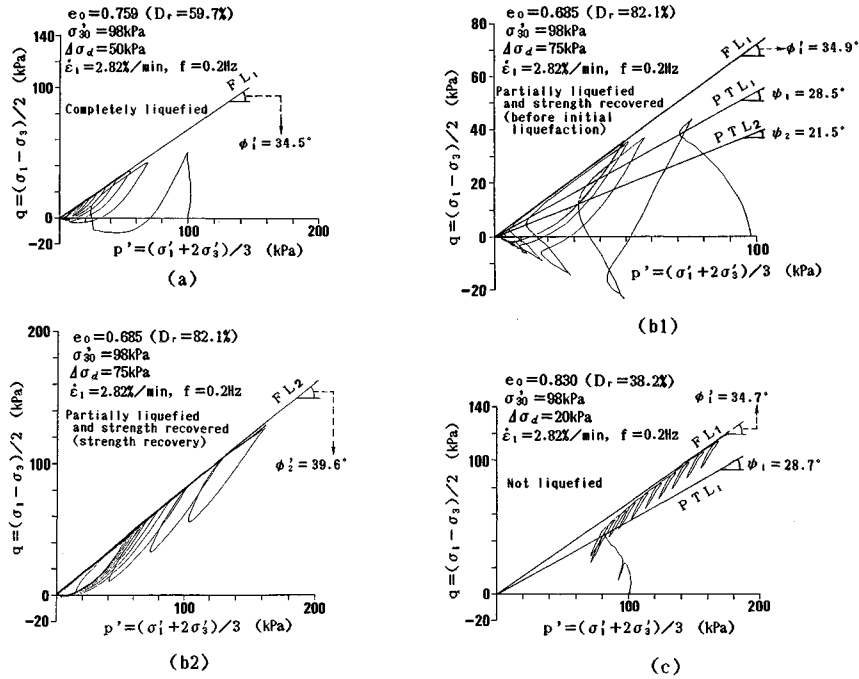


Fig. 9 Typical stress paths in DCU-test.

期液状化がみられ、その後の載荷により完全な液状化が発生している。初期液状化を生じたサイクルでの応力経路の包絡線FL₁より求めたせん断抵抗角φ_iは34.5°であった。Fig. 8(b) および Fig. 9(b) は、強度回復のみられた例であり、N=5~6で初期液状化がみられたが、その後の載荷によっても完全な液状化には至らず、N=12前後から過剰間隙水圧が減少し始めて強度が回復し、引き続き載荷によりせん断破壊を起こしたと思われる。

Fig. 9(b) の強度回復前の応力経路に着目すると、N=1~5に変相点がみられる。しかし、N=1における変相点と原点を結ぶ直線（これを第1変相線PTL₁とよぶ）とN≧2での変相点を結ぶ直線（以下、第2変相線PTL₂とよぶが、これも原点を通る）の2本の変相線がみられ、それぞれの横軸に対する傾角φ₁およびφ₂は、28.5°および21.5°であった。また、初期液状化を生じたサイクルでの応力経路の包絡線FL₁より求めたせん断抵抗角φ_iは34.9°であった。強度回復が発生し始めると、応力経路は新たな包絡線FL₂に沿う形で右上方へ移動している。FL₂の傾角より求めたせん断抵抗角φ₂は39.6°であった。なお、Fig. 9(b) では上述の第1変相線が現われているが、N=1においてPTL₁に到達しないような載荷によっても初期液状化は生じていた。

液状化が発生しない場合、Fig. 8(c) に示すように、載荷初期にみられる過剰間隙水圧の上昇はさほど顕著ではなく、ダイレイタンス効果による減少に転じている。

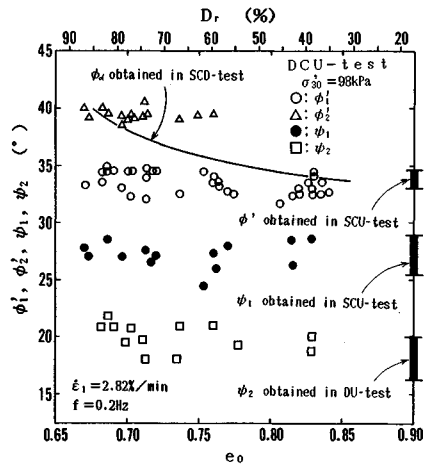


Fig. 10 φ and φ' versus initial ratio.

応力経路は、Fig. 9(c) に示すように、繰返し載荷による変動を示しつつも、非排水静的圧縮試験にみられるような経路を示した。変相線の傾角およびせん断抵抗角はそれぞれ、φ₁=28.7°、φ_i=34.7°であった。

以上に述べた変相線の傾角およびせん断抵抗角は初期間隙比に対して、Fig. 10 のような傾向にあり、φおよびφ'は初期密度に影響されない。また、φ_iは初期液状化時あるいは液状化を生じずにせん断破壊するときのせん断抵抗角であるが、これは非排水静的圧縮試験にお

る破壊包絡線の傾角にほぼ一致する。さらに、 ϕ_1 および ϕ_2 はそれぞれ、非排水静的圧縮試験における変相線および「両振りせん断」の第2変相線の傾角にほぼ一致する。

ここで、密な砂において、初期液化化から強度回復に至る過程で、 ϕ' が増大し、強度回復時の破壊包絡線が FL_1 より大きな勾配となることについては、強度回復が要素としての供試体内で生じたかどうかという問題があるので、本論文では特に触れない。

以下では、試験で得られた間隙水圧変化および液化化特性について考察を行い、「静的+繰返しせん断」時の飽和砂の液化化条件についても検討する。

なお、液化化を生じる場合には、有効拘束圧がゼロに近づくと、繰返し応力の制御が完全ではなく、Fig. 8(a) および (b) にみられるように、特に伸張側で応力振幅の減少が生じていた。初期液化化時の繰返しせん断応力の振幅は、载荷の第1サイクルにおける振幅の70%程度まで減少した。また、応力振幅の減少にも関連して、「静的+繰返しせん断」の場合には、軸ひずみ両振幅 (DA) は有効拘束圧がゼロになった場合にも1~2%程度しか発生しなかった。そこで、液化化に関する以下の整理では、液化化判定は初期液化化時点でを行い、繰返しせん断応力比 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ は、初期液化化までの各サイクルにおける繰返しせん断応力比の平均値としている。

(3) 「静的+繰返しせん断」時の最大過剰間隙水圧に及ぼす静的せん断の影響

「静的+繰返しせん断」試験において発生した過剰間隙水圧の最大値を、最大過剰間隙水圧 u_{max} とする。

Fig. 11 は、 u_{max}/σ'_{30} と繰返しせん断応力比 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ との関係を示したものである。図には、すべての試験データを示したが、●印のうち $u_{max}/\sigma'_{30}=1.0$ のものはすべて、液化化後に強度回復が生じた。また、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}=0$ のデータは、非排水静的圧縮試験によるものである。

図より、 u_{max}/σ'_{30} は、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ が0.1程度より小さければ、非排水静的圧縮試験の場合とほぼ同じ値となっており、この範囲では、 u_{max} に対する繰返し载荷の影響はほとんど現われておらず、静的载荷の影響が卓越していると考えられる。 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ が0.1より大きくなると、 u_{max}/σ'_{30} は急激に増大し、緩詰め砂 ($e_0=0.819\sim 0.839$, $D_r=35.5\sim 41.5\%$) では $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}\geq 0.17$ で、密詰め砂 ($e_0=0.670\sim 0.719$, $D_r=71.8\sim 86.7\%$) では $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}\geq 0.20$ で、 $u_{max}/\sigma'_{30}=1.0$ となって、液化化が生じた。

最大過剰間隙水圧に及ぼす静的せん断の影響を検討するために、 u_{max} を生じたときのせん断ひずみの静的载荷成分 γ_{su} と $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ との関係を表わしたものが、Fig. 12 である。図中の黒塗りの印は、液化化を生じた

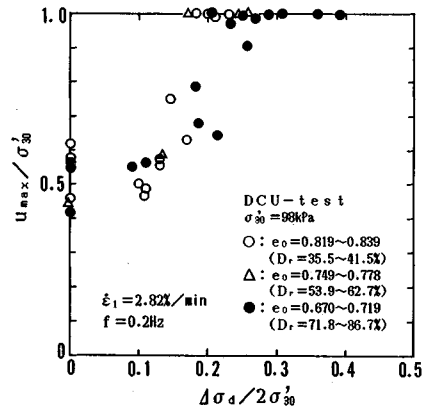


Fig. 11 u_{max}/σ'_{30} versus cyclic shear stress ratio.

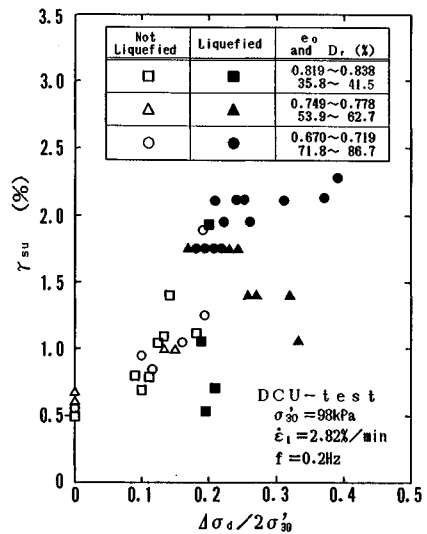


Fig. 12 Static component of shear strain at the maximum excess pore water pressure.

ものであり、 $u_{max}/\sigma'_{30}=1$ となった初期液化化時の γ_{su} の値をプロットしてある。図より、液化化を生じない場合の γ_{su} は、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ が大きくなるにつれて増大する傾向にある。 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ がさらに増大し、液化化を生じるようになると、緩詰め砂の場合 (■印) には急激に γ_{su} の値が減少しており、緩い砂で液化化が生じるような繰返しせん断応力レベルにおいては、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ の増大に伴って、液化化に対する静的载荷の影響が急激に減少し、繰返し载荷の影響が卓越した状態になると考えられる。これに対して密な砂の場合 (●印) には、 γ_{su} は初期液化化時にも2%程度生じており、静的载荷と繰返し载荷の相互作用下で液化化現象が生じていると考えられる。

今回の試験における上述の検討より、液化化を生じないような载荷条件下では、密度によらず、過剰間隙水圧

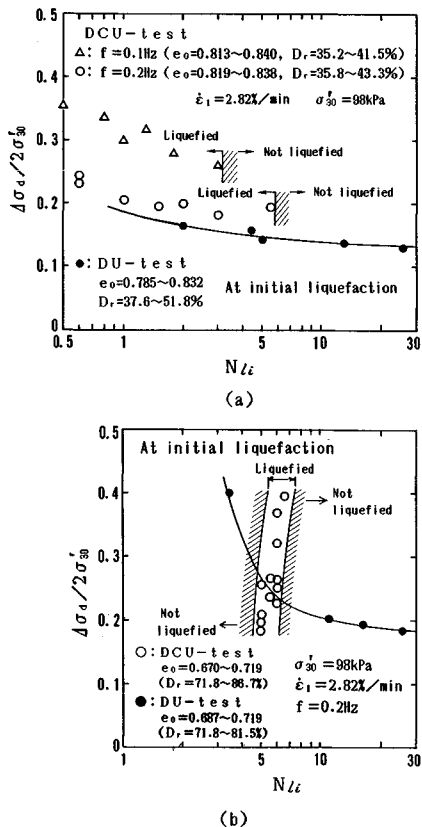


Fig. 13 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ versus N_{Li} in DCU-test.

上昇に対する静的載荷の影響は繰返しせん断応力振幅が大きくなるほど顕著になると考えられる。これに対して液状化を生じる場合には、砂の密度が大きくなるほど、過剰間隙水圧上昇に対する静的載荷の影響が繰返しせん断の影響に比べて相対的に大きくなると考えられる。

(4) 初期液状化時の $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{Li}$ 関係

「静的+繰返しせん断」において液状化を生じる場合の、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と初期液状化までの繰返し載荷回数 N_{Li} の関係を Fig. 13 に示す。(a) 図は緩詰め砂 ($e_0=0.813 \sim 0.840, D_r=35.2 \sim 43.3\%$) の場合、(b) 図は密詰め砂 ($e_0=0.670 \sim 0.719, D_r=71.8 \sim 86.7\%$) の場合である。図中の○印は、 $f=0.2\text{ Hz}$ での「静的+繰返しせん断」試験のデータである。また、図中には比較のために「両振りせん断」における $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{Li}$ 関係を示してある。なお、Fig. 13(a) には、 $f=0.1\text{ Hz}$ での「静的+繰返しせん断」試験の結果も示してあるが、これについては(6)で述べる。

緩詰め砂の場合 (Fig. 13(a))、○印で示す「静的+繰返しせん断」試験での $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{Li}$ 関係は、「両振りせん断」時と同様に右下がりの傾向をもつが、液状化強度は「両振りせん断」のものより若干大きな値をとるよ

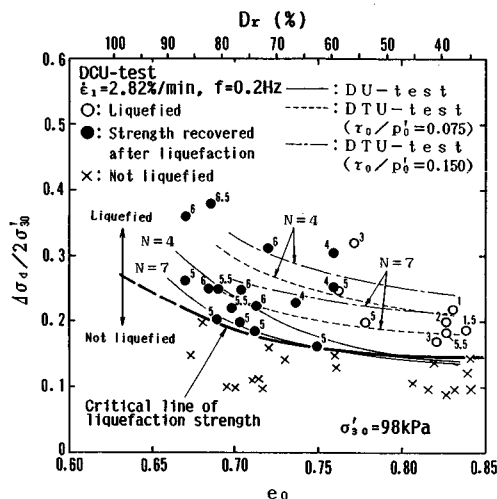


Fig. 14 Liquefaction condition in DCU-test.

うにみえる。さらに注目すべきことは、今回採用した静的載荷速度と繰返し載荷周波数の条件下では、 $N \geq 6$ での液状化現象はみられなかったということである。

一方、Fig. 13(b) の密詰め砂の場合には、全く異なった傾向を示した。すなわち、「静的+繰返しせん断」時の $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{Li}$ 関係は急な右上がりの傾向をもっており、繰返しせん断応力が大きくなると、液状化を生じるための N_{Li} も若干増加した。また、密詰め砂の初期液状化は $N_{Li}=5 \sim 7$ で生じており、 $N < 5$ および $N \geq 7$ での液状化現象はみられないという特異な結果が得られた。

今回の「静的+繰返しせん断」試験においては、初期密度によらず、繰返しせん断によるせん断応力の作用方向の反転がない場合には、液状化の発生は全くみられず、載荷の初期にある程度以上のせん断応力の反転が生じた場合に液状化が発生した。「片振りせん断」においても液状化発生に対するせん断応力の反転の影響について同様な指摘がされている⁶⁾。

このようなことより、Fig. 13 の $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{Li}$ 関係においてみられた特異な傾向を含め、「静的+繰返しせん断」における液状化現象は、排水状態での体積変化や非排水状態でのせん断応力の作用方向の反転の程度および回数等との関連で生じると考えられるが、これらはいずれも、静的載荷速度と繰返し載荷速度(周波数)の割合の影響を受ける。しかしながら今回の、静的載荷速度と繰返し載荷周波数の組合せからは、この影響について明確に言及することはできない。

(5) 「静的+繰返しせん断」時の液状化条件

繰返しせん断応力比 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ を縦軸に、初期間隙比 e_0 を横軸にとり、非排水「静的+繰返しせん断」時の初期液状化の有無について整理した結果を、Fig. 14 に示す。図中、○印は初期液状化後に強度を失った場合、

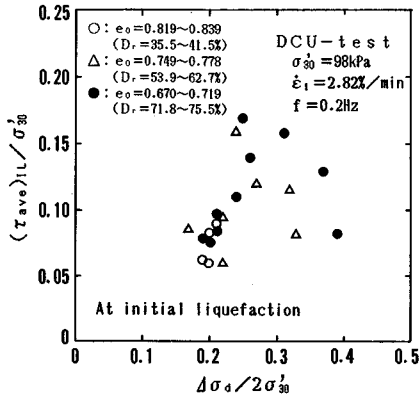


Fig. 15 Average shear stress ratio in DCU-test at initial liquefaction.

●印は初期液化化後に強度を回復した場合、×印は30回の繰返しせん断において液化化しなかった場合であり、データに付した数字は、初期液化化までの繰返し載荷回数 N_{ii} を表す。また、図中の太実線は「静的+繰返しせん断」試験における初期液化化の発生の有無を示す境界線である。さらに図中には、「静的+繰返しせん断」試験 ($D_r=35\sim 87\%$) での N_{ii} に対応した「両振りせん断」および「片振りせん断」での液化化強度線が示してある。

なお「片振りせん断」については、「静的+繰返しせん断」で初期液化化が生じた繰返しサイクルでのせん断応力の平均値 $(\tau_{ave})_{IL}$ の値 (Fig. 15 参照) を考慮し、初期せん断応力比 $\tau_0/p'_0=0.075$ および 0.15 の曲線が示してある。ただし、「静的+繰返しせん断」の各サイクルにおける平均せん断応力 (τ_{ave}) の値は、「片振りせん断」の場合とは異なり、載荷開始時にはゼロであり、静的載荷に伴って $(\tau_{ave})_{IL}$ まで漸増する。

Fig. 14 において、 $e_0=0.75$ 程度以下 ($D_r=62\%$ 程度以上) で $N_{ii}=5$ となったデータは、「両振りせん断」よりも小さい液化化強度を示している。これに対して、 $e_0<0.75$ で N_{ii} がさらに大きいデータや密度が小さいデータについては、「両振りせん断」よりも液化化強度は大きく、むしろ「片振りせん断」の液化化強度に近い値となっているようにみえる。

しかしながら、この傾向については (τ_{ave}) の変化の影響だけでは説明できず、前項で述べたように、ある載荷速度の静的せん断とある載荷周波数の繰返しせん断が同時に作用する場合、静的せん断変形によるダイレイタンス効果の影響、繰返しせん断によるせん断応力の作用方向の反転の影響などを同時に受けていると考えられる。

(6) 静的載荷速度と繰返し載荷周波数の影響

「静的+繰返しせん断」での非排水せん断特性は、静

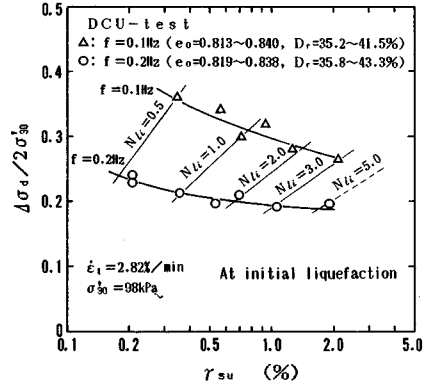


Fig. 16 Static component of shear strain at initial liquefaction.

的載荷速度と繰返し載荷周波数の組合せの影響を受けると考えられる。初期液化化時の $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}\sim N_{ii}$ 関係は、静的軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ が $2.82\%/min$ の場合、緩詰め砂では、Fig. 13(a)に示したように繰返し載荷周波数によって異なったものになっていた。すなわち、 $f=0.2\text{ Hz}$ の場合には前述のように、液化化強度は「両振りせん断」時よりも若干大きくなり、また $N\geq 6$ での液化化現象はみられなかった。これに対して $f=0.1\text{ Hz}$ の場合には、液化化強度は $f=0.2\text{ Hz}$ でのものよりもさらに大きくなり、また $N>3$ では液化化を生じないという結果が得られた。

Fig. 13(a) では、静的軸ひずみ速度は同じであるため、繰返し載荷周波数が小さいほど、ある繰返し載荷回数での静的せん断ひずみは小さく、静的せん断によるダイレイタンス効果の影響も小さくなると考えられる。Fig. 16 は、 $f=0.1\text{ Hz}$ と $f=0.2\text{ Hz}$ の場合について初期液化化発生時点における静的せん断ひずみ γ_{su} と $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ の関係を表わしたものであるが、ある繰返し回数、たとえば $N_{ii}=2$ の場合には、 $f=0.2\text{ Hz}$ で $\gamma_{su}=0.7\%$ であるのに対し、 $f=0.1\text{ Hz}$ では $\gamma_{su}=1.4\%$ と2倍の静的せん断ひずみが生じており、静的せん断に伴うダイレイタンス効果により、液化化を抑制する方向の影響が大きくなるために、液化化強度は $f=0.2\text{ Hz}$ の場合よりもさらに増大したと考えられる。

4. 結 論

本研究は、斜面内に構築された構造物近傍の地盤や土留め構造物背後の地盤のように、地震時に一方向への大変形を伴いつつ、動的載荷を受けることが予想される地盤の動的非排水特性を、「静的+繰返しせん断」状態の非排水三軸試験により、明らかにすることを目的として行ったものであり、その結論は次のように要約される。

(1) 「静的+繰返しせん断」における飽和砂の非排水せん断挙動は、供試体の密度および繰返しせん断応力

振幅によって、①比較的緩い砂で、液状化を生じ、強度を失う場合、②比較的密な砂で、いったん液状化を生じるが、その後数回の繰返し載荷で強度を回復し、せん断破壊する場合、③液状化を生じることなく、せん断破壊する場合の3通りの様相を示した。

(2) 「静的+繰返しせん断」時の有効応力経路において、 $p'-q$ 面上には、①液状化中の破壊包絡線 (FL_1)、②液状化後、強度回復時の包絡線 (FL_2)、③第1圧縮載荷時の変相線 (PTL_1) および④第1圧縮載荷より後の変相線 (PTL_2) が現われた。これらの勾配はそれぞれ密度によらず一定であり、 FL_1 および PTL_1 はそれぞれ、非排水静的圧縮試験における破壊包絡線および変相線に一致し、 PTL_2 は「両振りせん断」のものと同じとした。

(3) 「静的+繰返しせん断」における最大過剰間隙水圧 u_{max} に対して、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ が0.1程度より小さい範囲では、繰返し載荷の影響に比べ、静的載荷の影響がかなり卓越していると考えられる。 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ が0.1を越えると、 u_{max} は急激に増大し、緩詰め砂の場合には $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \geq 0.17$ で、密詰め砂の場合には $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \geq 0.20$ で、 $u_{max}/\sigma'_{30} = 1.0$ となり、液状化が生じた。

(4) u_{max} 発生時の静的せん断ひずみ γ_{su} は、液状化を生じない場合には、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ が大きくなるにつれて増大した。液状化を生じるような繰返しせん断応力では、緩詰め砂の場合 γ_{su} は急激な減少を生じたが、密詰め砂の場合には2%程度で一定となった。このことより、緩詰め砂では、液状化に対して繰返し載荷の影響が卓越するのに対し、密詰め砂では静的載荷の影響が相対的に大きくなり、繰返し載荷との相互作用下で液状化現象が生じていると考えられる。

(5) 「静的+繰返しせん断」時の $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30} \sim N_{ii}$ 関係において、緩詰め砂の場合は、「両振りせん断」の場合と同様に、右下がりの傾向をもつが、液状化強度は「両振りせん断」のものより若干大きな値をとった。これに対し、密詰め砂の場合には、急な右上がりの傾向、すなわち、 $\Delta\sigma_d/2\sigma'_{30}$ が大きくなると、 N_{ii} の値も若干増加するという傾向がみられた。さらに、今回採用した静的載荷速度と繰返し載荷周波数の条件下では、初期液状化に至る繰返し載荷回数は、緩詰め砂で $N < 6$ 、密詰め砂で $5 \leq N < 7$ の範囲に限られていた。

(6) 「静的+繰返しせん断」において、繰返しせん断によるせん断応力の作用方向の反転がない場合には、液状化の発生は全くみられず、ある程度以上のせん断応力の反転が生じた場合に液状化の発生がみられた。

(7) 「静的+繰返しせん断」における液状化強度は、「両振りせん断」と「片振りせん断」の中間的な強度と

なる。この傾向は、静的せん断と繰返しせん断が同時に作用する場合の、静的せん断変形によるダイレイタンスー効果の影響、繰返しせん断によるせん断応力の作用方向の反転の影響などを同時に受けていると考えられる。

(8) 緩詰め砂において、静的軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ が2.82%/minの場合、 $f=0.2$ Hzの場合の液状化強度は「両振りせん断」のものより若干大きくなり、また $N \geq 6$ での液状化現象はみられなかった。これに対して、 $f=0.1$ Hzの場合には、液状化強度は $f=0.2$ Hzのものよりもさらに大きくなり、また液状化現象は $N > 3$ ではみられないという結果が得られた。 N_{ii} が同じ場合、初期液状化発生時点における静的せん断ひずみ γ_{su} は、 $f=0.1$ Hzでは $f=0.2$ Hzの2倍程度生じており、静的せん断に伴うダイレイタンスー効果によって液状化を抑制する方向の影響が大きくなるために、 $f=0.1$ Hzでの液状化強度は $f=0.2$ Hzの場合よりもさらに増大したと考えられる。

「静的+繰返しせん断」において、密詰め砂の場合に液状化後の強度回復がみられたことは、地震時の土留め構造物背後の密な砂地盤等で、液状化後にせん断抵抗を回復する可能性を示唆しており、非常に興味深い。しかしながら、この強度回復が要素としての供試体で生じているかどうかについては、今後に検討が必要である。

終わりにあたり、本研究における実験に協力いただいた飯間清司君((株)鴻池組)に深甚なる感謝の意を表す。また、実験データの解析の一部には名古屋大学大型計算機センター FACOM M-780 を利用した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：4章 基礎の設計方針，建築基礎構造設計指針，pp.117~179，1988。
- 2) Andersen, K. H. : Cyclic Soil Data for Design of Gravity Structures, Proc. of ASCE, Vol.114, No. GE 5, pp.517~539, 1988.
- 3) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.249~273，1982。
- 4) Toki, S., Tatsuoka, F., Miura, S., Yoshimi, Y., Yasuda, S. and Makihara, Y. : Cyclic Undrained Triaxial Strength of Sand by Cooperative Test Program, Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.117~128, 1986.
- 5) 兵動正幸・村田秀一・安福規之・藤井照久・谷水秀行：初期せん断を受ける飽和砂の動的強度について，第24回土質工学研究発表会，pp.797~800，1989。
- 6) Vaid, Y.P. and Chern, J.C. : Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction, Soils and Foundations, Vol.23, No.1, pp.47~60, 1983.

(1989.9.28・受付)