

III-72 石の液状化に関する一考察

京都大学防災研究所 正員 柴田 徹
川崎製鉄建設技術部 正員 行友 浩

1. まえがき

飽和したゆるい砂は、比較的速い繰り返しせん断をうけると液状化現象を生じることがよく知られており、地震時の地盤災害と関連して従来から数多く研究がなされている。筆者らはさきに文献¹⁾において、液状化発生の繰り返し回数をせん断応力 τ_d と垂直応力 σ_v の関数として表示し、地中の土要素に所定のせん断応力を繰り返して加えた際に飽和砂中に発生し、かつ累加していく過剰間隙水圧について考察した。ついで液状化は土要素に加わる有効垂直応力が次第に減少し、やがて破壊包絡線に到達する過程と解釈して、その結果を適用して、 σ_v 一定の繰り返し三軸試験ならびに繰り返し単純せん断試験データ²⁾を検討し、各種の実験結果が矛盾なく説明できることを述べた。その後、砂の密度を数種類に変え、やはり σ_v 一定の繰り返し三軸試験を行なったので、前論文¹⁾の要旨に新しいデータの検討結果を加えて以下に報告する。

2. 砂の液状化と有効応力

地盤中の土の要素は、地震時には主として下部から伝達されるせん断波によって変形をうけるといわれる。したがって土要素は、地震中に何回も方向を変える一連の周期的せん断応力や変形をうけることになり、水平な地表面をもつ場合には、せん断面に作用する σ_v は一定のまま、方向が逆転するせん断応力 τ_d を繰り返しうける。

図-1(a)は載荷条件を全応力表示のモール円であらわしたものであり、図-1(a)応力条件
(b)有効応力軌跡。
破りに ① を圧縮、② を伸張状態とよぶことにする。①と②ではそれぞれ最大、最小主応力 σ_1 , σ_3 の大きさは等しいが、せん断応力の方向が逆転している点で異なっている。また図-1(b)はそういった有効応力軌跡であり、圧縮から伸張に移る過程と、伸張から圧縮に移る過程では直線の傾斜を変えて表わしてある。この模式図に示すように、 σ_v が一定の状態でも何回も方向を変える周期的せん断応力をうけると、過剰間隙水圧が累加されて増加するため有効垂直応力 σ_v' は徐々に減少し、その有効応力軌跡は左方に進行し、ついに破壊包絡線に到達した状態で液状化が始まる過程とみることができる。

3. 液状化解析の要式

土中に発生する間隙水圧の変化 Δu は

$$\Delta u = \Delta \sigma_m + \alpha \cdot \Delta T_{occ} \quad (1)$$

で与えることができる。ここに σ_m : 平均主応力, T_{occ} : 正八面体せん断応力, α : グレイグンシエ係数と圧縮係数の比である。 $\Delta \sigma_m = 0$ の条件を用い、図-1(a)を参照して ① → ② の過程に発生

する Δu の一般的な表示を求めると、

$$\Delta u = \sqrt{8/3} \cdot \alpha \cdot \tau_d \quad (2)$$

となる。また ① の圧縮から ② の伸張に移る場合と、その逆の場合とでは図-1(b) に示したように α の値に差があることを考慮し、繰り返しの 1 サイクル中に発生する過剰間げき水圧 $\Delta \bar{u}$ を求めると結局

$$\Delta \bar{u} = a \left\{ \left(\frac{\tau_d}{\sigma_v} \right) - \left(\frac{\tau_d}{\sigma_v} \right)_c \right\} \tau_d \quad (3)$$

を得る。ここに a : 土の粒類、密度によって異なる係数、 $(\tau_d/\sigma_v)_c$: 液状化が発生しない限界の (τ_d/σ_v) 値である。

式(3)を導く際に $\alpha (= \Delta u / \Delta \tau_{oct})$ が $\Delta \tau_{oct} / \sigma_m$ に比例して増加するという仮定を設けているが、それは作用する τ_d が大きいほど α も大となり、たとえば砂について σ_m を一定に保持したせん断試験結果をみると、 $\Delta u / \sigma_m \sim \Delta \tau_{oct} / \sigma_m$ 関係が双対数線に近似できるものが多いという事実にもとづいている。

つぎに 1 サイクル中に発生する $\Delta \bar{u}$ が繰り返し過程中を通じていかに変化するかを調べたところ、Yen³⁾ も述べているように、繰り返しの初期を除いてはほぼ一定値とみなしても差支えないことがわかったので、その過程中に $\Delta \bar{u}$ を不変と仮定する。このように $\Delta \bar{u} =$ 一定とすれば、液状化が発生するに要する繰り返し回数 n_l は図-1(b) を参照して次式で与えられることになる。

$$n_l = (\sigma_v - \tau_d \cdot \cot \phi') / \Delta \bar{u} \\ = \left\{ \left(\frac{\sigma_v}{\tau_d} \right) - \cot \phi' \right\} / a \left\{ \left(\frac{\tau_d}{\sigma_v} \right) - \left(\frac{\tau_d}{\sigma_v} \right)_c \right\} \quad (4)$$

式(4)が提案式であって、液状化発生までの繰り返し回数 n_l は地盤中の土要素に作用している σ_v と、与えられる τ_d の関数となり、 σ_v が大きくなるほど、また τ_d が小さくなるほど液状化は起こり難いことを示している。

4. 試験装置と試料

σ_v 一定で、しかも圧縮と伸張の両方にまたがる繰り返しせん断試験を行なうために文献(4)で紹介した振動三軸試験機を一部改良して使用した。実験は砂試料の密度を数種類に変え、 σ_v と τ_d の組み合わせも色々変えて行なった。繰り返しは全試験を通じて 2 cps とし、液状化が発生するまで供試体の軸方向変位、間げき水圧の変動を記録した。試料は水で飽和した豊浦標準砂であり、最大・最小間げき比はそれぞれ 0.95、0.64 である。

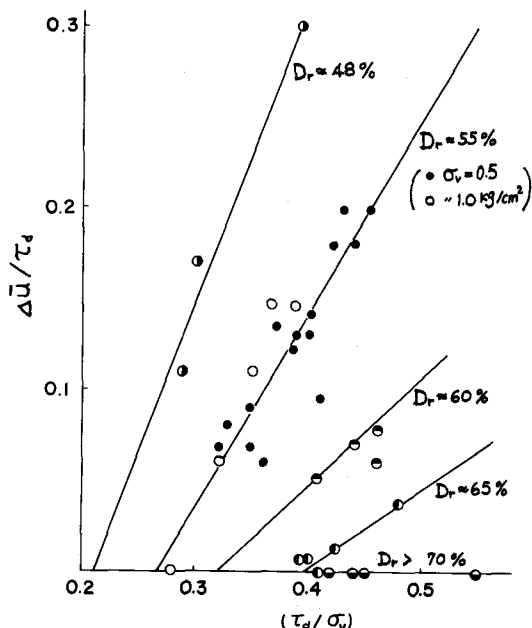


図-2 種々の密度における $\Delta \bar{u} / \tau_d$ と τ_d / σ_v の関係

5. 実験結果と考察

図-2は初期液状化発生までの各サイクルごとの間げき水圧の増分 $\Delta\bar{u}$ の平均値を求め、 $\Delta\bar{u}/\tau_0$ と τ_0/σ_v の関係にプロットしたもので、相対密度 $Dr \approx 48, 55, 60, 65\%$ のそれぞれについて、英はばらついているが、図中に示す直線群を描くことができるので、式(3)中に含まれる係数 a 、 $(\tau_0/\sigma_v)_c$ が求められる。そしてこれらの係数値ならびに φ' を用いて式(4)を計算した結果は、それぞれの密度に対して図-3中の実線にて示してある。

砂の密度を種々に変え、 σ_v と τ_0 の大きさを種々に組み合わせた結果について調べているわけであるが、この場合、 Dr が小さいほど、 τ_0 が大きいほど、また σ_v が小さいほど液状化が起こり易いと報告されている。ここでは式(4)によれば液状化発生回数 n_l は τ_0/σ_v の関数にちるうで、すべらうデ-7を $\tau_0/\sigma_v \sim n_l$ 関係に整理してみる。その結果が図-3にプロットされており、これによると、密度が同じであれば $\tau_0/\sigma_v \sim n_l$ の間には一義的な関係のちるうこと、および図-3の4枚を比較すると、密度が高くなるほど同じ n_l に対する τ_0/σ_v の値は大きくなることとがわかる。また式(4)を若干曲線は実験値の傾向と量的にもよく一致しているといえよう。

このように試料に作用する τ_0/σ_v 値が同じであっても、密度が低くなれば液状化し易くなる現象はダイレイタ-ンに起因する過剰間げき水圧が大きくなるためと理解されるが、これは式(3)中に含まれる係数 a 、 $(\tau_0/\sigma_v)_c$ によって量的に評価できる。すなわち図-4(a)(b)はこれら係数値と、液状化が発生しない限界相対密度 Drc と相対密度 Dr の差($Drc - Dr$)に対してプロットしたものでありこの図によれば Dr の増加とともに a は減少し、 $(\tau_0/\sigma_v)_c$ は増加することがわかる。ただし使用した砂の Drc は約70%である。

以上で砂の液状化を支配する四要素 τ_0 、 σ_v 、 Dr および n_l の相互関係を検討したが、これら $\tau_0/\sigma_v \sim Dr \sim n_l$ 関係に総括すると図-5の曲面が描かれる。この曲面が初期液状化を規定するもので、たとえば Dr と τ_0/σ_v が与えられれば n_l が求められることができる。この図は一応、 $n_l < 100$ 回、 $50 < Dr < 65\%$ の範囲に限定しているが、 Dr 軸に垂直な平面と液状化面の交線は、すでに図-3で説明した曲線となることは明らかである(ただし図-3では n_l は対数)。すなわち密度が一

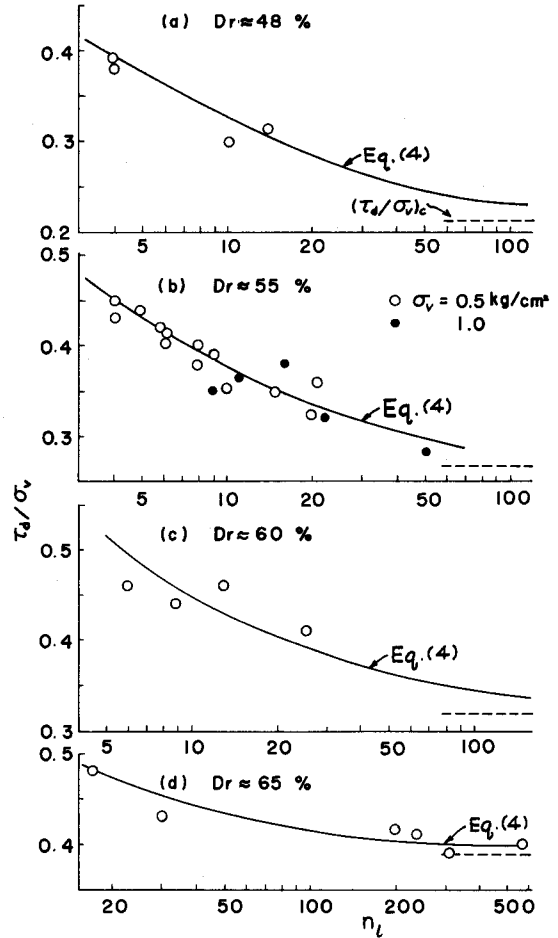


図-3 種々の密度における τ_0/σ_v と n_l の関係。

ならば、 $\tau_d/\sigma_v \sim n_i$ 関係に一般的な関係が成立し、 n_i を定めると $\tau_d \sim \sigma_v$ 関係が原点を通る直線で示されることになる。

なお液状化が生じない限界の $(\tau_d/\sigma_v)_c$ は、前述のように $\Delta \bar{u}/\tau_d = 0$ すなわち排水状態でも1サイクル中に体積変化が無いといふことであるから、弾性的挙動に対する降伏値と解釈することもできる。そして平均主応力一定の条件で砂の静的・排水せん断試験を行なった結果⁵⁾によると、体積変化が生じないとき τ_d/σ_v 比はその材料の物理摩擦 μ_m に対応している。仮りに砂の $\mu_m = 17^\circ$ とすれば $(\tau_d/\sigma_v)_c \approx 0.3$ であるが、図-4(b)より明らかのようにこの値は密度によって変動し、低密度では0.3よりも小さくなっている。砂の高速繰返しと静的挙動との相違として説明すべき一つの問題である。

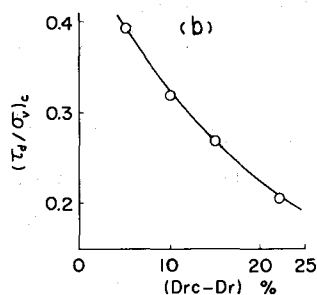
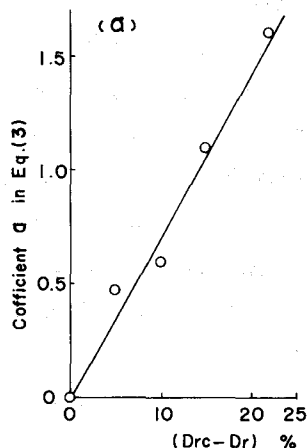


図-4 式(3)中の係数の密度による変化。

6. むすび

飽和砂の繰返しせん断による液状化の発生は、砂のダイレイクンシーに起因する有効応力の減少にともなうせん断破壊状態への接近過程と考え、液状化発生に要する繰返し回数 n_i を、繰返しせん断応力 τ_d と鉛直応力 σ_v との比 τ_d/σ_v の関数で式(4)のように表現した。その結果は図-3に示したように $\tau_d/\sigma_v \sim n_i$ 関係であらわす実験値の傾向と量的にもほぼ完全に一致し、したがって τ_d が大きいほど、また σ_v が小さいほど液状化が発生しやすいという争点を矛盾なく説明することゝできた。

また液状化を支配する要因の一つに砂の密度があり、これの影響については基本式に含まれる2つの係数との関連において若干の考察を加えた。

参考文献

1) 柴田, 行友: 飽和砂の繰返し載荷による液状化現象の研究, 土木学会論文報告集, 180号, 1970, p. 73.

2) Peacock, W. H., & H. B. Seed: Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions, Proc. ASCE, vol. 94, SM. 3, 1968, p. 689.

3) Yen, B. C.: Viscosity of Saturated Sand near Liquefaction, Proc. Int. Sympo. Wave propagation, New Mexico, 1967, p. 877.

4) 柴田, 行友: 砂の動態時強度について, 土木学会論文報告集, 176号, 1970, p. 75.

5) Frydman, S., & J. B. Zeitlen: Some Pseudo Elastic Properties of Granular Media, Proc. I. C. S. M. F. E., vol. 1, 1969, p. 135

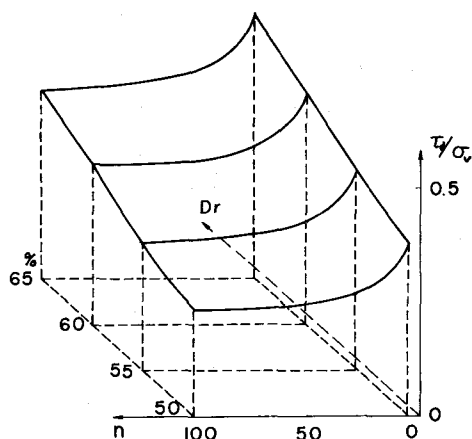


図-5 初期液状化面