

III-3

液状化に対して最も危険なせん断応力経路下の砂の液状化強度

五洋建設 正員 ○伊藤 学、名古屋工業大学 正員 松岡 元
清水建設 正員 福武毅芳、愛知県 野口 実

地震波のような任意方向の繰返し単純せん断を受けた場合、どのような応力経路を想定すれば液状化に対して最も危険であって、安全側の液状化強度を与えるかを見極めることは重要な問題である。ここでは、まず先に提案した“Bowl（おわん）モデル”¹⁾に基づいて、単純せん断面上のひずみ経路の中で最も危険と考えられる経路を論じ、そのひずみ経路を応力・ひずみ関係より応力経路に変換して、工学的にみて近似的に最も危険な単純せん断面上の応力経路を検討した。そして、従来の一方向繰返し単純せん断試験から得られる液状化強度との関係を求めた。

1. 等体積任意方向繰返し単純せん断試験の概要

実験には水平面内の任意の方向にせん断応力およびせん断ひずみを載荷可能な「任意方向単純せん断試験機」²⁾を用いた。非排水条件を再現するため、ボルトを立てて鉛直方向の変位、すなわち体積変化を拘束し、等体積条件のもとで繰返しせん断を行なった。実験に用いた試料は、飽和した豊浦砂（ $D_{50}=0.2\text{mm}$, $U_c=1.3$, $G_s=2.65$, 初期有効垂直応力 $\sigma'_{z0}=2.0\text{kgf/cm}^2$ のもとでの K_{0c} 圧密終了時の間隙比 $e_{0c}=0.71$ ）である。

2. 液状化に対して最も危険な単純せん断面上のひずみ経路

まず、せん断ひずみ経路に沿った長さを表わす累加せん断ひずみ G と半径方向の距離を表わす合せん断ひずみ Γ を次式で定義する。 $G = \int \sqrt{\Delta \gamma_{zx}^2 + \Delta \gamma_{zy}^2}$, $\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2}$ 。そして、これらの諸量を用いた“Bowlモデル”（図-1参照）によれば、次の2つの条件を満たすとき、体積ひずみまたは過剰間隙水圧が大きく発生することになる。条件①：累加せん断ひずみ G が大きい。条件②：合せん断ひずみ Γ が小さい（Bowl中心の底の近くを通る）。いま、ひずみ円経路とその円に内接するひずみ一方向経路（図-2参照）を比較すれば、1サイクル当りの G は $2\pi r$ と $4r$ （ r ：ひずみ円の半径）となりひずみ円経路の方が大きい、ひずみ一方向経路はBowl中心の底（ $\Gamma=0\%$ ）を通ることになる。ひずみ円の半径 $\Gamma=0.2\%$ の場合の実測値を比較すれば、図-3の白丸印と三角印で示すように、1サイクル当りの間隙水圧 $u(\sigma'_{z0}=2.0\text{kgf/cm}^2)$ はひずみ円経路の方が一方向経路より大きくなっている（図-3中の白色のプロットは $\Gamma=0.2\%$ の値、黒色のプロットは $\Gamma=0\%$ （Bowl中心の底）の値を意味する）。

そこで、ひずみ円経路と同じ $G(=2\pi r)$ をもち、かつせん断ひずみ座標の原点（Bowl中心の底）を通る経路としてひずみ8の字経路（図-2参照）を検討する。このひずみ8の字経路は、非現実的な特殊な経路を除けば、ひずみ円経路に内接する種々の経路の中で1サイクル当りの過剰間隙水圧の発生量が最も大きいものと考えられる。図-3中の四角印はひずみ8の字経路における発生過剰間隙水圧を示しているが、ひずみ円経路（白丸印）の場合より少し大きくなるもののほとんど変わらない。これは、白色と黒色のプロットを比較すればわかるように、 $\Gamma=0.2\%$ 程度のひずみ振幅においてはBowlの底を通る影響があまり効かないためである。ここで、ひずみ振幅 $\Gamma=0.2\%$ というのは後述するようにせん断応力 $\tau_z=0.3\text{kgf/cm}^2$ （ $\sigma'_{z0}=2.0\text{kgf/cm}^2$ ）程度に対応し（図-5参照）、図-9では繰返し応力比 $\tau_{cy}/\sigma'_{z0}=0.15$ に相当して液状化強度の対象となるひずみレベルである（あまり大きな応力振幅であると最初の1サイクルで破壊線に当たってしまう）。以上より、簡単なひずみ円経路を近似的に液状化に対して最も危険なひずみ経路とみることができよう。

なお、図-4は図-3と同じデータを累加せん断ひずみ G に対してプロットしたものである。Bowlモデルの考え方によれば、白色のプロット（ $\Gamma=0.2\%$ の値）と黒色のプロット（ $\Gamma=0\%$ の値）はそれぞれ同じカーブに乗らなければならないが、実験誤差の範囲でほぼ満足しているようである。

3. 液状化に対して最も危険な単純せん断面上の応力経路

前節において、ひずみ円経路を液状化に対して最も危険なひずみ経路と近似した。

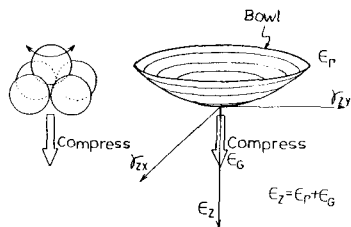


図-1 ひずみ空間におけるBowl（おわん）とその微視的イメージ

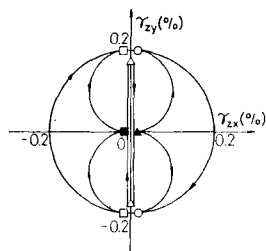


図-2 ひずみ振幅 $\Gamma=0.2\%$ の時のひずみ一方向、円、8の字経路

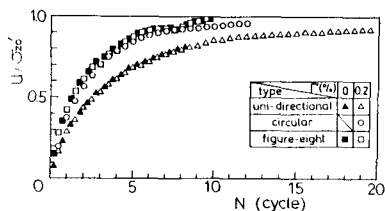


図-3 ひずみ一方向、円、8の字経路試験における $u/\sigma'_{z0} \sim N$ 関係

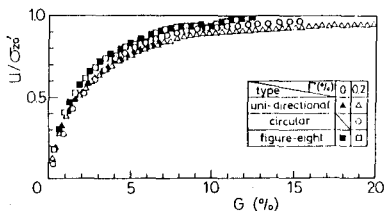


図-4 ひずみ一方向、円、8の字経路試験における $u/\sigma'_{z0} \sim G$ 関係

次に、液状化強度は通常応力で規定されるので、このひずみ円経路を応力円経路と対応付けることを試みる。図-5は、ひずみ円経路試験で最初に円周の $\Gamma=0.2\%$ まで載荷したときの応力・ひずみ関係(白丸印)と応力円経路試験で最初に円周の $\tau_z=0.3\text{kgf/cm}^2$ ($\tau_z = \sqrt{\tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2}$)まで載荷したときの応力・ひずみ関係(黒丸印)を示している(図-6, 7参照)。この図より、ひずみ制御か応力制御かだけの違いであるので、同じ応力・ひずみ曲線に沿って($\Gamma=0.2\%$, $\tau_z=0.3\text{kgf/cm}^2$)の点に至るのがみられる。その点から、一方は一定のひずみ円($\Gamma=0.2\%$)に沿って回し、他方は一定の応力円($\tau_z=0.3\text{kgf/cm}^2$)に沿って回すわけである。図-6より、 $\Gamma=0.2\%$ (一定)のひずみ円まで回すとせん断応力 τ_z は 0.3kgf/cm^2 から徐々に小さくなる傾向がみられるので、 $\tau_z=0.3\text{kgf/cm}^2$ (一定)の応力円経路の方が大きい間隙水圧を発生させるものと推定される。事実、図-8は、 $\Gamma=0.2\%$ のひずみ円経路(白丸印)と $\tau_z=0.3\text{kgf/cm}^2$ の応力円経路(黒丸印)における間隙水圧の発生状況を示しているが、液状化に至ったと考えられるせん断ひずみ $\Gamma=3\%$ までに生じる間隙水圧は応力円経路の場合の方が大きくなっている(なお、同図の応力円経路の最後の黒丸プロットに対応するせん断ひずみ Γ は 5% を越えている)。以上より、応力円経路で試験をすれば、液状化に対して近似的に最も危険な試験条件を与え、安全側の液状化強度が得られると推論される。

図-9は、添図に示す円、一方、8の字、十字、三葉の各種応力経路のもとでの繰返し応力比 τ_{cy}/σ'_{z0} (τ_{cy} :繰返しせん断応力振幅)と液状化を起こすまでの繰返し回数 N の関係を示したものである。液状化は $\Gamma=3\%$ になったときと定義した。同図より、やはり応力円経路下の液状化強度が種々の応力経路の中で最も低い値を示している。なお、一般によく行なわれている応力制御の一方向経路下の液状化強度と円経路下の液状化強度の関係は、図-9より(円経路下の液状化強度) $= (0.6 \sim 0.7) \times$ (一方向経路下の液状化強度)と表現できそうである。なお、石原・山崎によれば、富士川砂に対する上記の係数として0.65という値が提案されているが、この値はひずみ円経路の1サイクル当りの $G=2\pi r$ とひずみ一方向経路の1サイクル当りの $G=4r$ の比 $4/2\pi=0.64$ と一致していて興味深い。

以上より、応力円経路が工学的にみて近似的に液状化に対して最も危険な経路と考えられ、円経路下の液状化強度はよく行なわれる一方向経路下の液状化強度の約6~7割程度まで低下することがわかった。

謝辞

日頃御援助頂いている本学山内利彦教授、有益な助言を頂いた中井照夫助教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 松岡、福武、伊藤、三田村(1985): 第20回土質工学研究発表講演集, 118, pp.287-290.
- 2) 竹田、松岡、福武(1983): 第38回土木学会年次講演概要集, III-22, pp.43-44.
- 3) 石原、山崎(1980): S & F, Vol.20, No.1, pp.45-59.

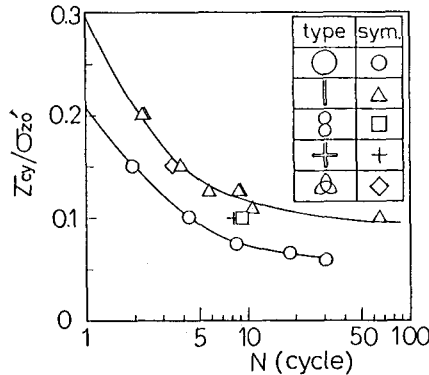


図-9 各種応力経路試験における繰返し応力比 τ_{cy}/σ'_{z0} と $\Gamma=3\%$ に至るまでの繰返し回数 N の関係

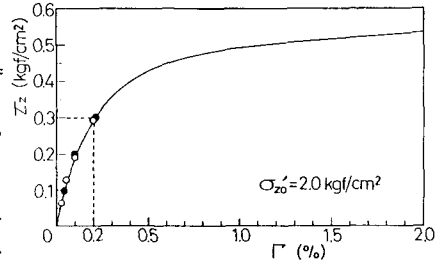


図-5 ひずみ円経路試験と応力円経路試験の第1載荷時の応力・ひずみ関係

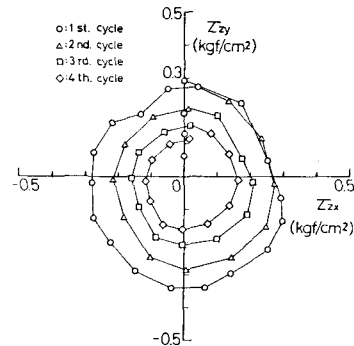


図-6 ひずみ円経路試験 ($\Gamma=0.2\%$) における応力経路

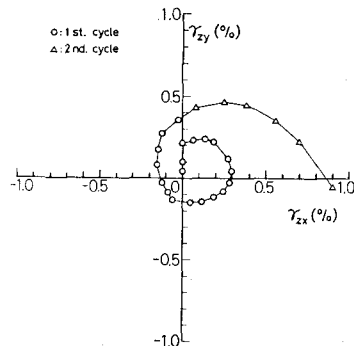


図-7 応力円経路試験 ($\tau_z=0.3\text{kgf/cm}^2$) におけるひずみ経路

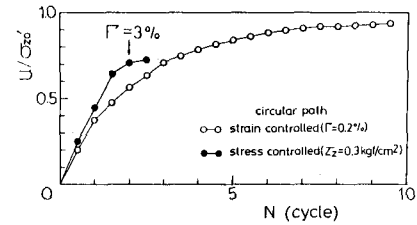


図-8 ひずみ円経路と応力円経路試験における $u/\sigma'_{z0} \sim N$ 関係