

中空ねじりによる液状化強度試験でのせん断応力・せん断ひずみ式について

中空ねじりせん断試験 砂 液状化

北海道大学 国際会員 ○西村 聡
中部土質試験協同組合 国際会員 久保 裕一

1. はじめに

地盤工学会関東支部「中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会」では、中空ねじりせん断試験を用いた液状化強度の同定法の基準化を最終的な目的として、同試験に関わる種々の技術項目の影響を再評価している。地震時の成層地盤内のように、水平方向にせん断応力が卓越する載荷モードを再現できるのが繰返し中空ねじりせん断の利点であり、(ねじり)せん断応力 τ と(ねじり)せん断ひずみ γ が同試験における主要な変数となる。一方で、この2つの変数は、中空円筒供試体の曲率により内壁と外壁の間で半径方向に変化し、一定ではない。よって中空ねじりせん断試験を要素試験として近似して結果を解釈する際には、これらの変数を何らかの方法で平均化し、代表的な値として扱うのが一般的である。本報では、まず中空ねじりせん断試験で一般的に用いられている τ と γ の式とその由来を整理し、その選択により具体的にどの程度の値の差異が生じるかを議論する。そして、上記委員会でも実施した珪砂7号の一斉試験結果に鑑みて、液状化強度同定に対する τ と γ の式の影響を考察する。

2. 平均せん断応力・平均せん断ひずみの式

中空ねじりせん断試験において平均せん断応力・平均せん断ひずみの式として一般的に文献で用いられているものを表-1にまとめた。式(1)・式(4)は中空ねじりせん断試験の古典的論文として影響力が大きい Hight et al. (1983)にて示されており、国際的によく採用されている。式(1)は平均せん断応力 $\bar{\tau}$ が代表値として水平面に一定に分布すると仮定し、面積分をしてトルク T との平衡から求めたものである。式(4)は、局所せん断ひずみ $\gamma = r\theta/H$ (ここで r :半径、 θ :ねじり回転角、 H :供試体高さ)を同様に面積分した後に面積で除して平均化したものである。式(1)・(4)は平均化に面積分を用いていることから、曲率により外周部の面積が相対的に大きくなる効果を考慮しているため合理的であるうえ、 $\bar{\tau}\Delta\bar{\gamma} \times V = T\Delta\theta$ が成り立ち(V :体積)、内部仕事と外力による仕事が一一致するという熱力学的整合性も有する。式(2)は British Columbia 大学での研究などで用いられており、 τ が γ に比例、すなわち半径 r に比例した大きさをもって分布していると仮定したうえで面積分してトルク T との平衡から求められる。この式(2)は、式(4)と組み合わせ使用すると $\Delta\bar{\tau}/\Delta\bar{\gamma}$ が局所的な $\Delta\tau/\Delta\gamma$ 、すなわちせん断剛性率 G と一致するという特徴がある。よって、微小ひずみ剛性の計測などの目的に対して利点があるといえる。これに対し、式(1)は $\bar{\tau}$ が水平面に一定値として分布していることを想定しているため、例えば吉嶺(1996)はこれを剛塑性の仮定と解釈しており、大ひずみ下での終局状態での使用に適切としている(吉嶺は土の挙動は線形弾性と剛塑性の中間的として式(1)と式(3)の平均を $\bar{\tau}$ として採用している)。

現在の地盤工学会基準(JGS 0543・JGS 0551)では、せん断ひずみの式として式(5)を示している。これは中間半径 $(r_i + r_o)/2$ でのひずみであるが、曲率のため平均半径より小さいことに留意が必要である。せん断応力の式としては、変形特性・強度いずれも対象とする一般的なせん断試験の基準である JGS 0551 では式(1)を示しているが、変形特性を対象とする JGS 0543 では式(3)を採用している。式(3)の由来は式(2)と類似しており、せん断応力は半径に比例分布すると仮定したときの中間半径 $(r_i + r_o)/2$ でのせん断応力に相当する。以上より、仮にせん断ひずみが上下端で与えるねじりに均一に追随したとしても、せん断応力は土試料の構成関係に依存することもあり、その平均値あるいは代表値を常に正しく与える式は存在せず、それぞれの式に異なる合理性・不合理性があるといえる。

3. 計算される平均せん断応力・平均せん断ひずみの相違と一斉試験結果に基づく議論

表-1 中の式を比較するにあたり、それぞれから計算される平均せん断応力・平均せん断ひずみの値を式(1)および式(4)に対する比として表すと、これは内外径比 r_i/r_o のみの関数となり、図-1のように表すことができる。一斉試験の報告より、日本国内では専ら $r_i=30\text{mm} \cdot r_o=70\text{mm}$ ($r_i/r_o=0.43$ 、9 機関採用)あるいは $r_i=60\text{mm} \cdot r_o=100\text{mm}$ ($r_i/r_o=0.60$ 、5 機関採用)と設定され、用いる式によって平均せん断応力に最大で約 9%、平均せん断ひずみに約 4%の差異が生じる。液状化強度試験としての中空ねじりせん断試験を考える際、これらの差異が最終的に求める液状化強度曲線、すなわち応力比 τ/σ'_0 (σ'_0 :初期有効応力)と液状化までの繰返し載荷回数 N の関係にどのような影響を与えるかを評価する必要がある。後述のように、 N の同定に対して $\bar{\gamma}$ の式はほと

表-1 平均せん断応力・平均せん断ひずみの式

平均せん断応力	平均せん断ひずみ
$\bar{\tau} = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (1)$ <p>Hight et al. (1983)など。 JGS 0551 で採用。</p>	$\bar{\gamma} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4)$ <p>Hight et al. (1983)など</p>
$\bar{\tau} = \frac{4T(r_o^3 - r_i^3)}{3\pi(r_o^4 - r_i^4)(r_o^2 - r_i^2)} \quad (2)$ <p>Wijewickreme and Vaid (1991)・ Sayao and Vaid (1991)など</p>	$\bar{\gamma} = \frac{\theta(r_o + r_i)}{2H} \quad (5)$ <p>JGS 0543・JGS 0551 で採用。</p>
$\bar{\tau} = \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \quad (3)$ <p>JGS 0543 で採用。</p>	<p>(r_i: 内径、r_o: 外径 その他は本文中に定義)</p>

んど影響を与えないが、式(1)の選択に依存した $\bar{\tau}$ の値の相違は液状化強度曲線の縦軸(τ/σ'_0 軸)方向位置、ひいては液状化強度 R_{L20} の相違そのものとなって結果の解釈に影響する。図-2は一斉試験結果の R_{L20} (試験機関より式(1)で τ を計算して報告されている)を r_i/r_o に対して示したもので、式(3)を用いたときと合わせて R_{L20} の平均値を同図中の表に示した。他から外れて低い R_{L20} を報告した1機関の結果を除いた平均も示している。データ全体のばらつきに比べると、式の間での相違は小さく、 r_i/r_o に対する R_{L20} の体系的な相違の説明要因にはなっていない。なお、 r_i/r_o は応力・ひずみ不均一性の他、メンブレン張力・メンブレンペネトレーションの相対的大きさなど他の要因も介して結果に影響しうること留意されたい。

液状化強度試験は基本的に応力比($\bar{\tau}$ 振幅)を一定に制御して行うため、せん断ひずみの計算は出力処理ということになり、 $\bar{\gamma}$ の不確定性は N のカウンタにのみ影響を与える。そこで、一斉試験結果のひずみ振幅—繰返し载荷回数—の関係に対し、式(4)および式(5)の両者により N の値を確認した。図-3は $r_i/r_o=0.43$ 、相対密度50%あるいは80%の条件より、応力振幅が大きいケースと小さいケースでのせん断ひずみ時刻歴の例である。ここではせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{DA}=7.5\%$ を液状化発生の基準としたが、いずれの例においても N のカウンタが $\bar{\gamma}$ の式に影響されることはない。図-2(c)(d)のように密度が高い条件ではせん断ひずみの増加が緩やかであり、用いる式によって N が ± 1 異なって判定される可能性もあるが、このようなケースではそもそも N が大きいため、その影響は小さい。なお、当然ながら過剰間隙水圧増加量に基づいて液状化判定を行う場合は $\bar{\gamma}$ の定義はその結果に無関係である。

4. まとめ・謝辞

供試体内の応力・ひずみ分布が必然的に不均一となる中空ねじりせん断試験において、どのように応力・ひずみ変数の代表値あるいは平均値を表すかは従前からの課題であり、その不均一性が小さくなる形状や試験条件が模索されてきた。液状化強度試験に関する限り、現在一般的に用いられている内外径比では、異なる式によって算出されるせん断応力・せん断ひずみの差異は小さく、液状化強度曲線の縦軸(τ/σ'_0 軸)に沿ってのわずかなオフセットにしか影響しない。よって表-1に示した式はいずれも使用を許容しうるが、大変形時が重要である液状化強度試験の性質上、液状化強度試験でのデフォルトとしては式(1)(4)の使用が最も合理的であると考えている。本報では地盤工学会関東支部「中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会」による一斉試験結果を利用した。一斉試験に参加した諸機関と担当者、および同委員会メンバーに謝意を表す。

参考文献：Hight et al. (1983) The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils. *Geotechnique* 33 (4) 355-384. / Sayao, A. & Vaid, Y. P. (1991) A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens. *Soils and Foundation* 31 (1) 60-72. / Wijewickreme, D. & Vaid, Y. P. (1991) Stress nonuniformity in hollow cylinder torsional specimens. *Geotechnical Testing Journal* 14 (4) 349-362. / 吉嶺充俊 (1996) 単調载荷による飽和砂の非排水流動変形に関する研究. 東京大学博士論文

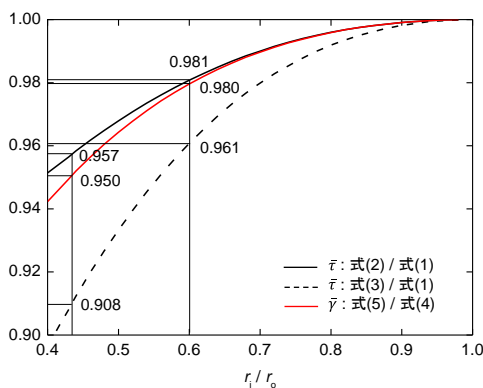


図-1 異なる式による $\bar{\tau}$ および $\bar{\gamma}$ の比較

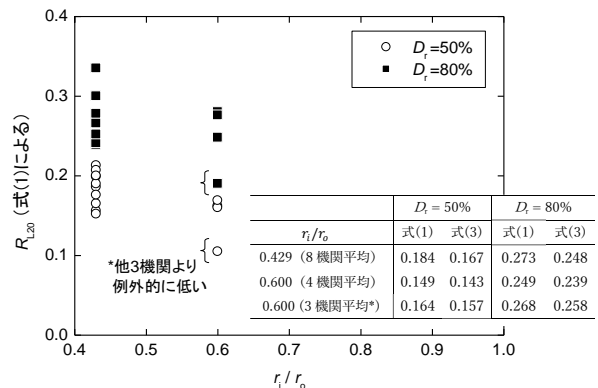


図-2 一斉試験結果の R_{L20} :内外径比に対して

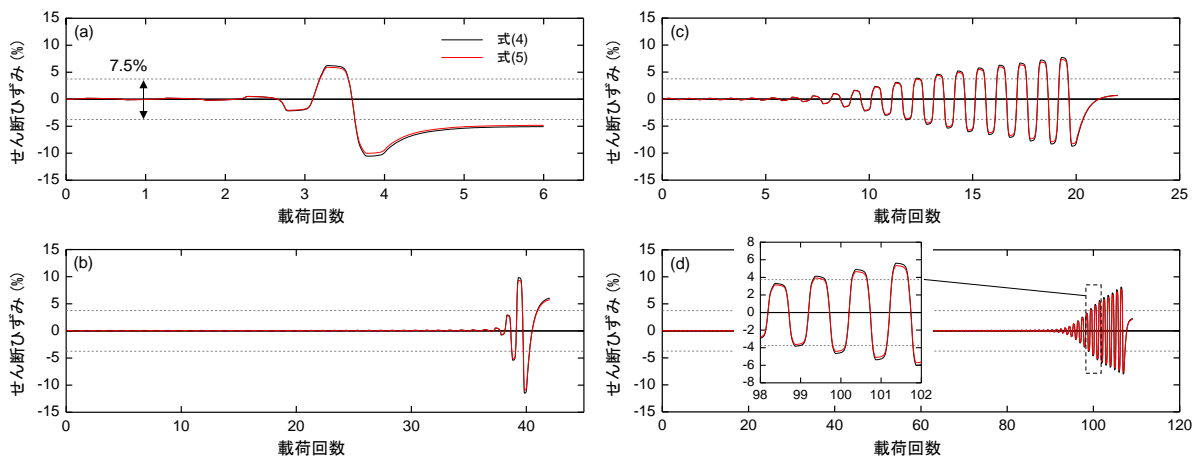


図-3 せん断ひずみの時刻歴の例 (a) $D_r=50\%$, $\tau/\sigma'_0=0.229$ (b) $D_r=50\%$, $\tau/\sigma'_0=0.160$ (c) $D_r=80\%$, $\tau/\sigma'_0=0.309$ (d) $D_r=80\%$, $\tau/\sigma'_0=0.229$