

令和3年度 耐震性評価のための地盤調査・土質試験の運用事例ワークショップ

中空ねじりによる 液状化一斉試験の概要

長岡技術科学大学
豊田 浩史

1

講演内容

- 委員会について
- 基準の整備状況
- 試験装置の特徴
- 一斉試験の概要

2

委員会の設置

- 委員会名

JGS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

- 構成

委員長：清田 隆（東京大学生産技術研究所）

幹事：三上 武子（基礎地盤コンサルタンツ）

基本事項WGのリーダーとなる：一斉試験のたたき台を作成。

3

委員会の目的

- 現状：

実務でも中空ねじりによる液状化試験が行われてきているが、基準が存在しない。

- 目的：

1. 基準化のための基礎的データの提供

2. 三軸試験との比較

3. 液状化後の挙動把握

（例えば、体積ひずみ、剛性率回復）

4

第1部 現状の把握

- 基準の整備状況
- 試験装置の特徴
 - ・ 三軸試験
 - ・ 中空ねじり試験

5

基準の整備状況（供試体）

- JGS 0520：土の三軸試験の供試体作製・設置方法
- JGS 0530：粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法
- JGS 0550：土のねじりせん断試験用中空円筒供試体の作製・設置方法

供試体の作製と設置：三軸（粗粒土も）、ねじりとも整備されている。

6

基準の整備状況（単調載荷）

- JGS 0521：土の非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験方法
- JGS 0522：土の圧密非排水（CU）三軸圧縮試験方法
- JGS 0523：土の非圧密非排水（CUB）三軸圧縮試験方法
- JGS 0524：土の圧密排水（CD）三軸圧縮試験方法
- JGS 0551：土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法

単調載荷試験：三軸（細かく分類）、ねじり（非排水、排水を同じ基準内で記述）とも整備されている。

7

基準の整備状況（変形特性）

- JGS 0542：土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法（以降、三軸変形試験と称す）
- JGS 0543：土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法（以降、中空変形試験と称す）

変形特性試験：三軸、ねじりとも整備されている。

8

基準の整備状況（液状化）

- JGS 0541：土の繰返し非排水三軸試験方法（以降，三軸液状化試験と称す）

液状化試験：三軸のみ整備されている。

基準番号からすると，三軸液状化試験は三軸変形試験より先に基準化された。当時，中空液状化試験は実務での普及が少なかったか???

三軸変形試験に続き，ねじり変形試験は基準化された（実務的普及も問題ないと判断）。

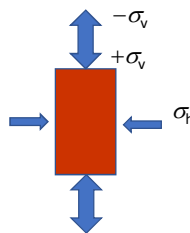
現状を考えると，**中空液状化試験の基準化**は進めるべき。

9

三軸試験の特徴

三軸試験で繰返し载荷：
側圧一定で，鉛直応力を変化

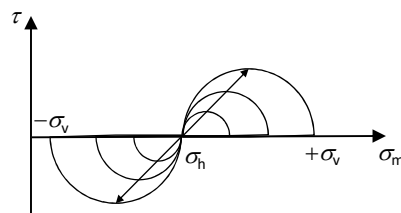
軸差応力の作用により，
間接的にせん断応力を発生させる



側圧を変化させ， $\sigma_m = \text{一定}$ 試験も可能であるが...

軸対称応力であるため，
三軸圧縮時： $\sigma_v > \sigma_h = \sigma_h (b=0)$
三軸伸張時： $\sigma_h = \sigma_h > \sigma_v (b=1)$
の三主応力状態となる。

せん断応力を大きくしていくと，引張り力が作用
(供試体とキャップやペDESTアルを接着させる必要あり)

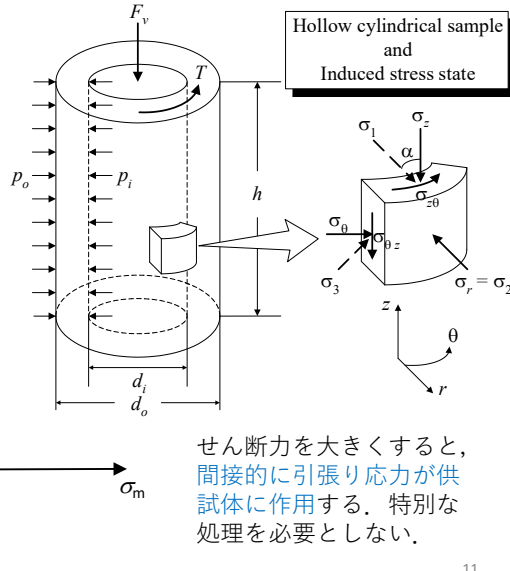


10

中空ねじり試験の特徴

中空ねじり試験で繰返し荷重：
側圧，軸応力一定で，せん断応力（ねじり力）を変化

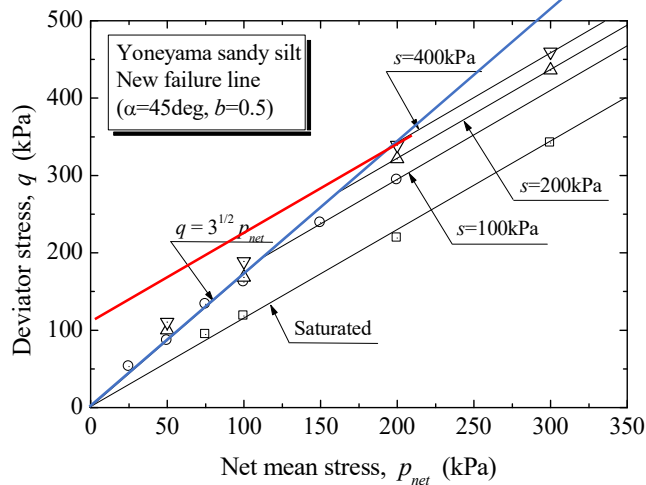
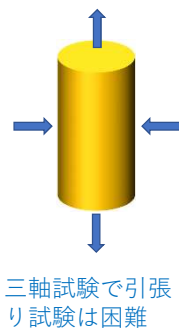
直接，せん断応力を作用させる：
実地盤に近い状態



11

中空ねじり試験の特徴

Tension cut-off line



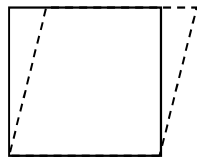
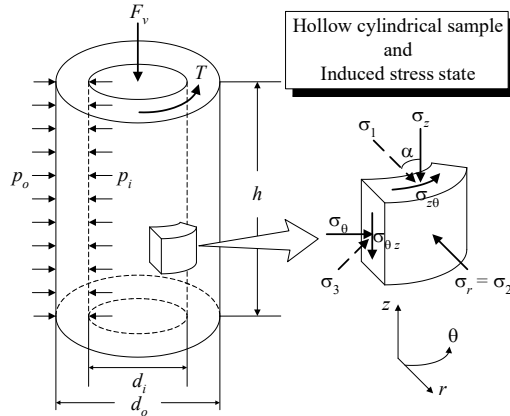
中空ねじり試験による不飽和土の破壊線：赤線は期待できない

Toyota, H., Nakamura, K., Sakai, N. and Sramoon, W., Mechanical properties of unsaturated cohesive soil in consideration of tensile stress, *Soils and Foundations*, 43(2), 115-122, 2003.

12

中空ねじり試験の特徴

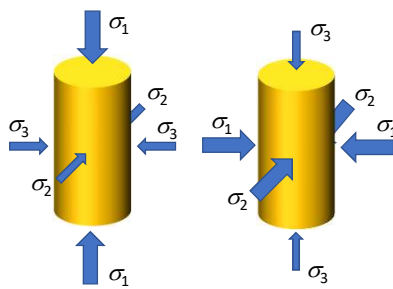
単純せん断状態を比較的容易に再現可能
 簡易法：非排水 + 軸変位固定
 厳密法：非排水 + 軸変位固定 + 内径or外径を固定



単純せん断状態

三軸と差別化をはかる意味で、単純せん断状態で液状化試験を実施することも考えられる。

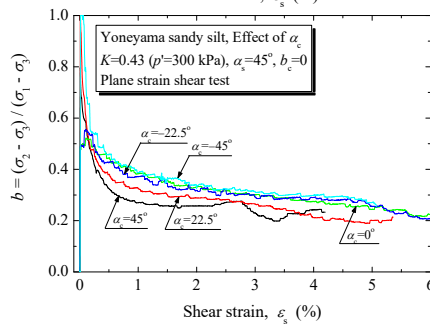
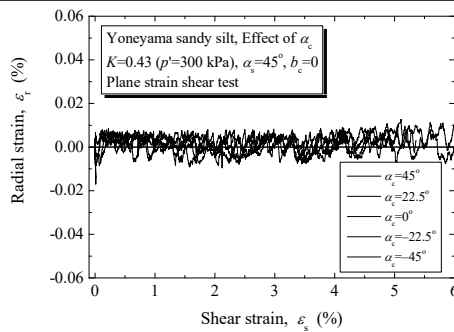
中空ねじり試験の特徴



$\sigma_2 = \sigma_3$
三軸圧縮 $b=0$

$\sigma_1 = \sigma_2$
三軸伸張 $b=1$

中空ねじり試験では、平面ひずみせん断試験も可能。



Toyota, H., Susami, A. and Takada, S., Anisotropy of undrained shear strength induced by K_0 consolidation and swelling in cohesive soils, *Int. Journal of Geomechanics*, 14(4), 04014019, 2014.

第2部 一斉試験の概要

- 基本方針
- 試験構成
- 試験仕様
 - ・ 試料
 - ・ 供試体
 - ・ 測定
 - ・ 飽和と圧密
 - ・ 繰返し非排水せん断
 - ・ 繰返しせん断後の試験
 - ・ 結果の整理
 - ・ 報告事項

15

基本方針

- 供試体寸法や使用器具 (リブ, メンブレンなど) 等の影響
- 軸制御方法 (荷重一定, 変位固定) の影響
- 試験機関による試験結果のばらつき
- 三軸試験との比較

すでに三軸液状化試験基準が存在するため, 中空ねじり液状化試験結果の利用方法について検討する (三軸試験との差別化はできるのか?) .

16

試験構成

相対密度	軸制御	実施機関
50%	軸力一定	A, B, D,
50%	軸変位固定	B, C
80%	軸力一定	A, B, D
80%	軸変位固定	B, C

- ゆるい砂：軸変位固定で供試体上部でひずみの局所化が起こらないか
- 密な砂：三軸試験のように伸張方向でネッキングを起こすようなことは無いのでは。密な供試体に強み？

17

試験仕様（試料）

- 市販の7号珪砂で検討
- 一斉購入で各機関に配布

メンペネの影響の小さな試料を使う。

18

試験仕様（供試体）

- 空中落下法を使う
- ノズルや漏斗は委員会で製作，配布
- 相対密度の許容誤差は±3%

ゴムスリーブにグリッドを描き，変形状態を確認しやすくする。

19

試験仕様（測定）

- 軸力，軸変位，ねじり力，回転角，セル圧，間隙水圧および体積変化量
- 圧密時にも連続データを取得

1サイクルあたり40点以上。

20

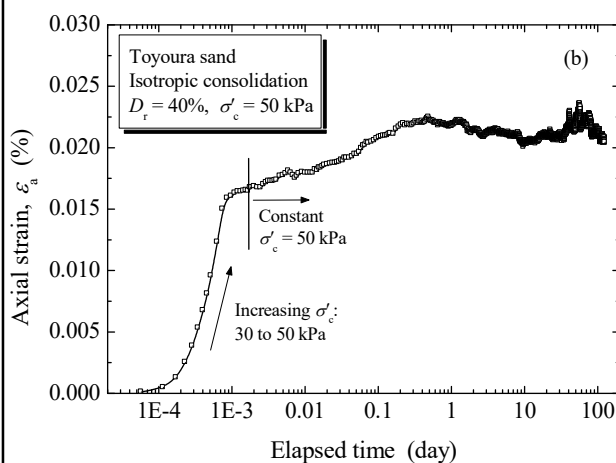
試験仕様（飽和と圧密）

- B 値は0.95以上
- 背圧200 kN/m², 100 kN/m²で等方圧密
- 圧密時間は30分

飽和度の低下に留意（圧力室の上方に空気を残してセル圧を8時間以上加える場合は、圧密後の B 値も測定する）。

21

圧密時間に関して



排水量では読み取れない変化がある：局所軸ひずみ測定

5時間程度は上昇：
軸ひずみ0.005%程度

圧密時間はできるだけ
合わせるべき

Toyota, H. and Takada, S., Mechanical properties of cementitious sand and sand with small cyclic shear strain to assess aging effects on liquefaction, *Acta Geotechnica*, DOI: 10.1007/s11440-021-01368-6.

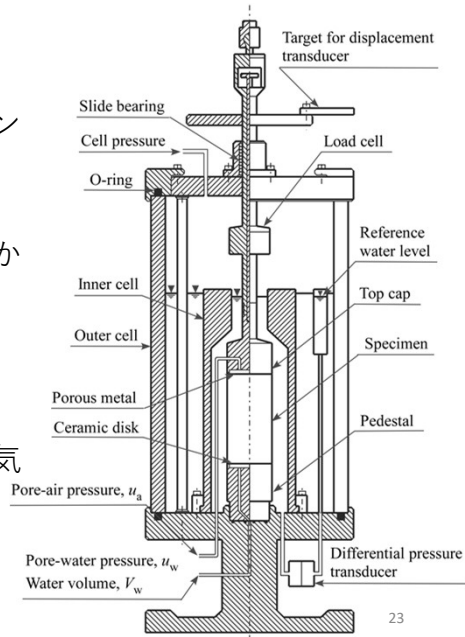
22

飽和度の低下

- セル空気がセル水に溶け込む
- セル水の溶存空気がメンブレンを通して間隙水に溶け込む
- 時間とともにB値が低下
- セル水にシリコンオイルを浮かべると上記を防げる

余談ですが、

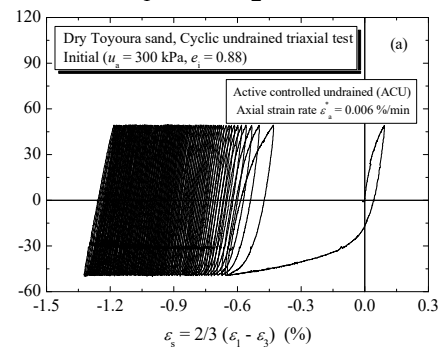
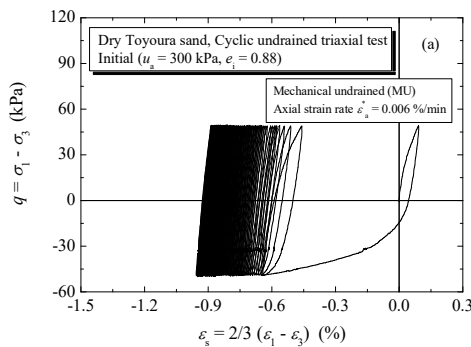
- 不飽和土においては、間隙空気がセル水に溶け込む
- 非排気試験は難しい



乾燥砂の非排気繰返し試験

Boyle-Charlesの法則を利用

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$



Toyota, H. and Takada, S., Technique for undrained triaxial tests on unsaturated soils using active control of pore-air pressure, *Geotechnical Testing Journal*, 35(3), 480-489, 2012.

試験仕様（繰返し非排水せん断）

- ねじり力の載荷波形は0.1Hzの正弦波
- 両振幅せん断ひずみ15%まで
- 繰返しせん断応力振幅は，1つだけ決めて，他の3つは試験機関に任せる
- 等方応力の他，軸変位固定もオプション

解析屋から大きなひずみまでの要望。0.1Hzを守ろうとすると難しい。

25

試験仕様（繰返しせん断後の試験）

- 再圧密を行い，体積ひずみを測定
- 残留せん断ひずみをゼロに戻す
- 連続データを取得（排水バルブをゆっくり解放）

液状化後の単調載荷による剛性率回復試験などもあるが，両振幅せん断ひずみ15%まで，繰返しせん断を行うこととした。

26

試験仕様（結果の整理）

物理量	[ねじり CUB/CD 基準]	[ねじり変形基準]
軸ひずみ ϵ_o	$\epsilon_o = \frac{\Delta H}{H_c}$	—
体積ひずみ ϵ_v	$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c}$	—
せん断ひずみ γ	$\gamma = \frac{\Delta\theta(r_o+r_i)}{2H}$ (方法 1)	$\gamma_{si} = \frac{\Delta\theta_{ni}(r_m+r_n)}{4H_n}$ (方法 1)
せん断応力 τ	$\tau = \frac{3T}{2\pi(r_o^3-r_i^3)} - \Delta\tau_n$ (方法 3) $\Delta\tau_n = \frac{2E_s r_n (r_o^3+r_i^3)}{(r_o^3-r_i^3)(r_o+r_i)} \gamma$	$\tau_s = \frac{T_s+T_n}{2\pi(r_m^2+r_n^2)(r_m-r_n)}$ (方法 1)
軸方向応力 σ_a	$\sigma_a = \frac{P}{A} \frac{1-\epsilon_v}{1-\epsilon_o}$	—

大ひずみまで対象とする、ねじりCUB/CD基準を使用する。
 ただし、せん断ひずみは $\gamma = \frac{2\Delta\theta(r_o^3-r_i^3)}{3H(r_o^2-r_i^2)}$ を使用する。

27

試験仕様（報告事項）

- 液状化強度比：20回で両振幅せん断ひずみ 7.5%に達する繰返し応力振幅比
- 動画撮影を行い、最大せん断ひずみ発生時の静止画（変形状態を確認）

軸応力が一定となっているか報告する。

28

試験仕様（データの提出）

- 共通フォーマットの電子データ（Excel）で生データ（トルク，回転角等）から提出．当然，計算値も（応力，ひずみ）．
- 波形（時刻歴），応力ひずみ，応力経路，応力振幅－繰返し回数図も作成