

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560500

研究課題名（和文） 粘着力を有する砂質土の合理的な液状化判定手法の開発

研究課題名（英文） Development of reasonable liquefaction strength estimation for cohesive sandy soils

研究代表者

仙頭 紀明（SENTO NORIAKI）

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40333835

研究成果の概要（和文）：

地盤改良砂等の粘着力を有する砂質土の液状化強度を簡便、かつ低コストで評価するために応力制御繰返し一面せん断試験を提案した。種々の砂質土と粘性土を対象として、液状化試験を実施して、既往の実務で使用する実験装置から得られた実験結果と比較することで液状化強度には高い相関が認められた。さらに、実務で液状化試験に利用する際の課題として液状化判定基準に用いる両振幅水平変位の合理的な設定があることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Stress-controlled cyclic direct shear test to simply estimate cyclic resistance ratio (CRR) of cohesive sandy soil such as treated soil by lower cost was proposed in this study. Cyclic shear tests for various sandy soils and clay were conducted. The CRR obtained by proposed test gave a good agreement with the CRR obtained by conventional cyclic test of hollow cylinder test. In addition, the problem to be solved for practice application such as a reasonable criteria decision of double amplitude horizontal displacement for triggering liquefaction was pointed out.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：液状化，砂質土，粘着力，一面せん断試験，液状化判定

1. 研究開始当初の背景

(1) 1995年の兵庫県南部地震以降，原子力施設等の重要土木構造物や高層建築物の耐震設計には，大振幅の入力地震動を基盤に入力し，表層地盤の非線形性を考慮した耐震設計

が行われている。このような設計では，地中に過大なせん断応力が作用することになり，これまで非線形性を考慮していなかった地盤改良砂等の液状化判定を行う機会が増加している。

(2) 軟弱地盤の地盤改良工法では、近年経済性に配慮した低強度の改良土が用いられるようになってきている。その際、強震時の非線形性の評価方法が確立されていないことが問題である。地盤改良砂の強非線形挙動に関する室内要素実験について非排水繰返し三軸試験を実施すると、粘り強い強度・変形特性を示すことがわかっている。この挙動には粒子間に働くセメンテーションによる粘着力が大きく寄与している。しかし、これらの砂質土の強度・変形特性の定量評価には至っていないことが現状である。

(3) 粘着力を有する砂質土の強震時の非線形性評価の問題点のひとつとして、供試体作成時の乱れに起因した繰返しせん断強度の過小評価が考えられる。これは供試体作成時に上下端面の整形により乱れが生じ、繰返し三軸試験や中空ねじりせん断試験において、上下端面位置でネッキングや局所的なすべりが生じるためである。このような実験結果を設計に用いると不経済となっていることが想定された。したがって、これらの供試体成形時の乱れの影響を最小にするような、室内実験手法の提案が不可欠であると考えられた。

(4) 粘着力を有する砂質土の強震時の強度・変形特性の評価を行う試験として、定体積応力制御繰返し一面せん断試験による繰返しせん断試験を提案した。一面せん断試験は、1) 簡便で実務でも使いやすい。2) 供試体の寸法が小さい。3) 供試体高さの中央付近を直接せん断するため、供試体成形時の乱れの影響が小さい。4) 定体積条件で試験を行うことで飽和度の影響をあまり気にしなくてもすむ。等の利点がある。特に乱れの少ない条件で、強度・変形特性の強度指標を簡便かつ経済的に求められることは有意義であり、実務への適用性が非常に高いことも特徴である。

2. 研究の目的

(1) 従来の三軸試験やねじりせん断試験と比較して、より簡便に液状化強度を求めることができる定体積繰返し一面せん断試験装置を作製し、その装置の基本性能を把握する。
(2) 開発した試験装置を利用して、応力-ひずみ関係が得られる単純せん断試験ができるように改良して、その試験装置の基本的性能を確認する。
(3) 作製した装置を用いて地盤改良砂、細粒分を含む砂質土、粘土等を対象にして繰返しせん断強度（液状化強度）を求め、既存の繰返しせん断試験装置である中空ねじりせん断試験の結果と比較することで、各装置の液状化強度の相関を求める。
(4) 各装置の長所と短所を比較することで、各試験装置の位置付けを明確にするともに、実務において実験装置を利用する際の課題

や留意点を整理する。

3. 研究の方法

(1) 装置の製作は、実務における利用を念頭におくと広く実務で用いられている一面せん断試験装置に、最小限の改造を施すことに対応した。以下に開発した2種類の繰返しせん断試験装置について示す。

①応力制御繰返し一面せん断試験

従来、定体積せん断試験に用いる改良型一面せん断試験装置をベースに、応力制御繰返しせん断ができるように改良を加えた。すなわち、サーボコントローとパルスモーター式載荷装置を作製して、改良型一面せん断試験装置に組み込んだ。

②積層リング型単純せん断試験

上記の一面せん断試験装置のせん断箱に変えて、厚さ3~5mmのステンレス製リングを積み重ねたものである。なお、リングの表面には摩擦軽減を目的としてテフロン加工を施した。また従来の単純試験装置は、メンブレンを有する構造であるが、今回作製した装置は一面せん断試験と同様にメンブレンのない構造である。

(2) 実験に用いた試料

実験に用いる試料は、砂質土及び粘性土を対象にした。以下に今回用いた試料について示す。

①砂5号

粘着力のない砂として用いた。平均粒径0.39mm、細粒分含有率0%の均等な粒度分布を持つ砂である。相対密度70%になるように空中落下法で作製した。

②海成粘土

広島県産の海成粘土を用いた。液性限界110.7%、塑性限界37.8%であり、塑性図により分類するとCH（粘土（高液性限界））であった。液性限界の2倍程度の含水比にしたスラリー状の試料を70kN/m²で20日間予圧密したものを使用した。

③火山灰質砂質土

福島県浜通りの寺沢産および君ヶ沢産の火山灰質砂質土である。粒度分布から砂質土（SF）に分類されるものの、塑性指数が10~40程度あり砂質土と粘性土の性質を併せ持つ中間土に相当する。所定の含水比に調整後、突固めによる土の締固め方法（A法）により作製した。

④浸透固化試料

地盤改良砂として浸透固化処理工法に用いる浸透固化薬液で改良した浸透固化試料を用いた。浸透固化処理工法は、既設構造物直下の液状化対策に用いる浸透性恒久薬液である。試料はシリカ濃度4%の薬液に砂5号を水中落下させて作製した。

(3) 試験方法

砂5号以外の試料はカッターリング法に

より直径 6cm, 高さ 2cm に成形した. 供試体を圧密圧力 100kN/m^2 で圧密し, 圧密の終了は 3t 法により確認した. その後, 繰返し一面せん断試験では上下せん断箱の隙間を 0.2mm に調節した. 繰返しせん断試験機における垂直荷重の荷重は空気圧シリンダーで行った. せん断荷重は前述のパルスモーターを内蔵した水平荷重用アクチュエーターをサーボコントローラーで制御してサイン波 (0.1Hz) を荷重した. 定体積制御は装置上部のメカニカルジャッキを用いて手動により垂直変位を $\pm 0.01\text{mm}$ 以内に制御した. 一面せん断試験ではせん断箱上部は固定, 下部が可動条件にて繰返しせん断を実施した. 比較のために実施した中空ねじりせん断試験については, 繰返しせん断過程を除く試験の手順については, 地盤工学会基準 JGS0550 および 0551 に準拠して実施した. せん断過程は, 非排水条件で, 荷重周波数 0.1Hz の正弦波のせん断応力を作用させた. 実験では, 各試料について, 異なる 3 つの繰返しせん断応力比を与えたケースを実施することで, 液状化強度曲線を求めた.

4. 研究成果

(1) 試験装置

本研究で作製した試験装置を以下に示す.

① 応力制御繰返し一面せん断試験装置

装置の寸法は, 高さ 92cm , 幅 50cm , 奥行き 30cm とこの種の装置としてはコンパクトである. 装置の概要を図 1 に示す. せん断箱はステンレス製で下部せん断箱, 上部せん断箱, 加圧板, ピストンからなる. 垂直変位計により下部せん断箱と上部のピストン間の垂直変位 ΔH を計測する. これにより, ロードセルやベアリングの機械的な変形を含まない土の垂直変位が計測できる. なお, 垂直荷重のロードセルは下部せん断箱の下面(反力板側)に設置している. せん断荷重は上述のようにパルスモーターを内蔵した水平荷重用アクチュエーターをサーボコントローラーで制御してサイン波を荷重した.

② 積層リング型単純せん断試験装置

外径 8.96mm , 内径 6.00mm で高さがそれぞれ 5mm , 3mm , 1mm の三種類のリングを積み重ねることで供試体全体がせん断されるような構造とした. 図 2 に繰返し単純せん断試験装置の概要を示す. 上から 5mm を 1 枚, 1mm を 16 枚, 3mm を 1 枚と計 24mm とし, 土のせん断変形が拘束されないようにメンブレンが無い構造とした. なお, 装置の諸元, 制御装置および垂直・水平荷重の荷重方法は前述の一面せん断試験と同じである.

(2) 各種試験装置との比較

① 応力ひずみ関係と有効応力経路

種々のせん断試験より得られた砂 5 号の応力-変位, ひずみ関係および有効応力経路を

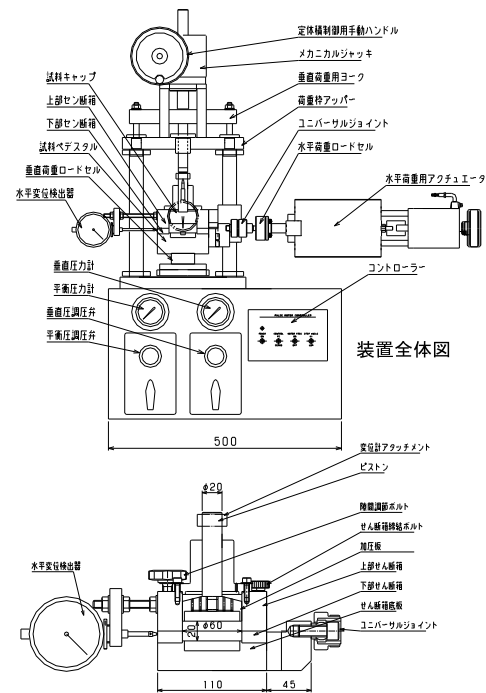


図 1 繰返し一面せん断試験装置の概要

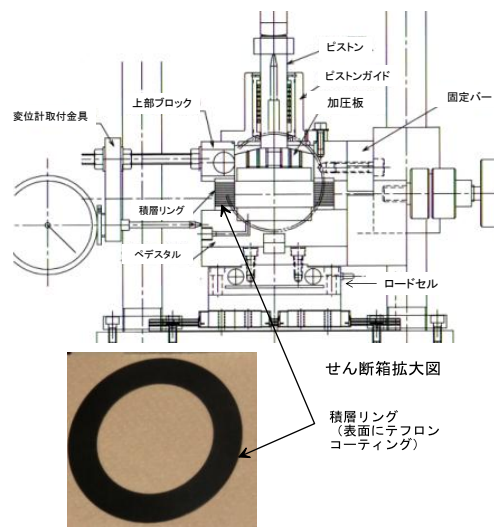


図 2 積層リング型単純せん断試験装置の概要

図 3 に示す. 有効応力経路に着目すると (b), (f) より, 繰返し一面および繰返し単純試験は荷重とともに有効応力が減少し, その後, せん断変位増加の際に有効応力が回復する現象がみられた. この挙動は中空ねじりの有効応力経路 (d) でみられる液状化した砂質土にみられるサイクリックモビリティ現象と類似していた. 中空ねじり試験は, 既存の試験方法の中で地震による繰返しせん断挙動を精度良く評価できる試験法の一つであり, その試験法と比べても, 今回製作した試験機の試験結果は遜色のないものである.

②液状化強度

図4に種々のせん断試験による各試料の液状化強度曲線を示す。繰返し一面では両振幅せん断変位 $\delta_{DA}=0.2, 0.4, 1.0\text{mm}$ の結果を示した。一方、中空ねじり、繰返し単純では両振幅せん断ひずみ $DA=2, 5\%$ の結果を示した。種々のせん断試験の繰返し載荷回数 $N=20$ 回における液状化強度の比較より、珪砂5号、海成粘土では $\delta_{DA}=1.0\text{mm}$ 、寺沢産、浸透固化試料では $\delta_{DA}=0.2\text{mm}$ が中空ねじりおよび繰返し単純の $DA=5\%$ に近い値を示した。

そこで、図5に中空ねじりまたは繰返し単純の $DA=5\%$ のときの $N=20$ 回の液状化抵抗比 τ/σ_{mo}' と繰返し一面の $\delta_{DA}=0.2$ または 1.0mm のときの $N=20$ 回の液状化抵抗比 τ/σ_{mo}' の比較を示す。図より、繰返し一面の $\delta_{DA}=0.2\text{mm}$ または 1.0mm は中空ねじりの $DA=5\%$ の0.99倍の液状化強度を示し、多少低い液状化抵抗比を示した。一方繰返し一面の $\delta_{DA}=1.0\text{mm}$ は繰返し単純の $DA=5\%$ の1.10倍の液状化強度となり、若干高い液状化抵抗比を示した。よって、繰返し一面は繰返し単純と中空ねじりの中間の液状化強度を示した。このことから、今回作製した2つのせん断試験機は、既存の装置から得られる液状化強度と相関は高く、液状化強度を簡便に求めるといった当初の目標は概ね達成できていると考える。

(3) 比較結果のまとめ

表1に種々のせん断試験機の各項目(操作性、試験コスト、液状化強度、応力-ひずみ、装置の普及)に対する評価をまとめた。繰返し一面せん断試験は応力-ひずみ関係は得られないが、中空ねじりに比べ試験にかかる時間が短く、操作も簡単で供試体寸法が小さく液状化抵抗を経済的に評価できる。また、液状化強度は中空ねじりに比べ若干低く安全側の評価が可能である。繰返し一面は基準化されていないせん断試験であるが、定体積制御を行うことで飽和試料を用いた中空ねじりの $N=20$ 回における液状化抵抗比と比べてもほぼ等しいことから液状化判定のための指標として利用できる可能性が示された。また、非排水せん断強度確認に用いる一軸圧縮試験に近い手軽さで液状化強度を求められることから実務での活用が期待される。例えば、現在地盤改良砂の液状化抵抗評価は、一軸圧縮試験を介して行っているが、一面せん断試験は一軸圧縮試験+ α の労力で直接液状化強度を求めることができる。また現在普及している一面せん断試験装置を一部改良することで液状化試験に対応できることも1つの利点である。

(4) 今後の課題

繰返し一面を実務で用いるには、液状化判定のための両振幅せん断変位 δ_{DA} の基準を明確にする必要がある。今回の研究ではせん断

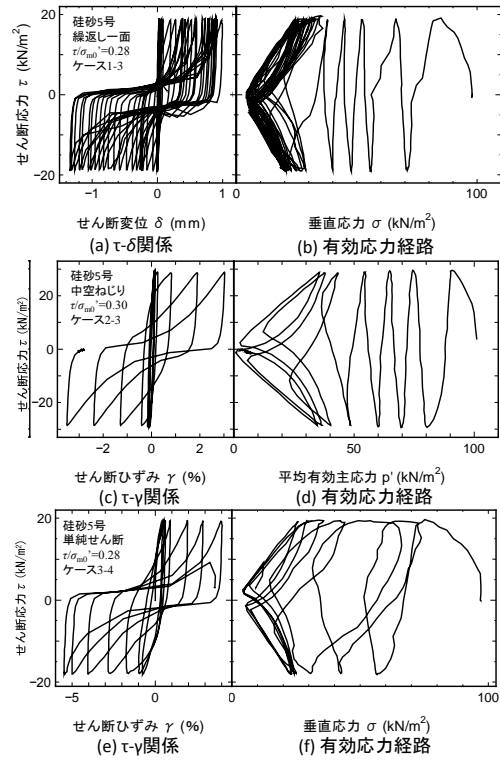


図3 種々のせん断試験結果の例

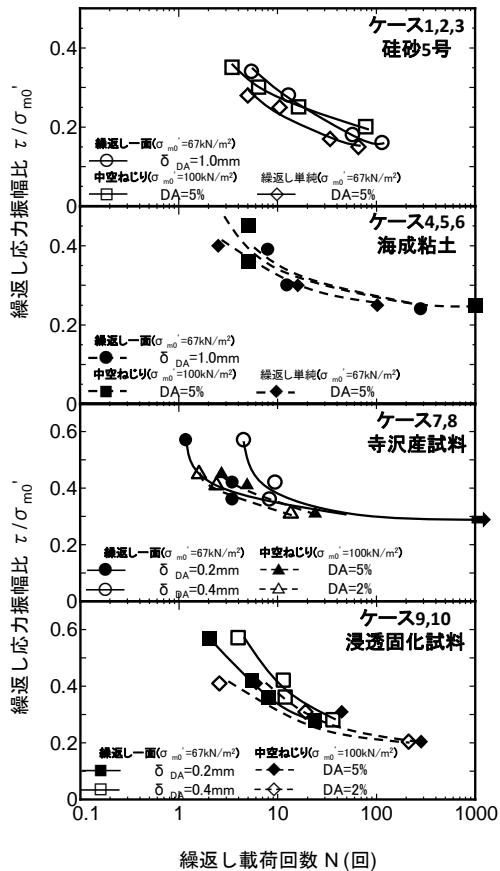


図4 液状化強度曲線の比較

変位と従来判定基準に用いられるせん断ひずみを直接結び付ける合理的な関係を見出すことはできなかった。具体的な解決策としては、今回行ったように、対象とする試料について従来の試験法によるキャリブレーションを事前に実施して、両者の対応関係を把握しておくことが妥当であろう。

また一面せん断試験はせん断箱の中央にすき間をあける構造上、用いる試料の最大粒径がせん断強さに与える影響が指摘されており、液状化強度にも影響を及ぼすことが考えられる。今回実験を行った砂質土の最大粒径は、2.0mmであり、従来粒径の影響が始めるとされる0.425mmよりも大きだったが、液状化強度の評価には影響はほとんどみられなかった。ただし試験機の構造上、粒径の影響は必ず生じるため、上記と同様に対象土について事前のキャリブレーションを行った上で適用の可否について判断しておくことが望ましい。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計6件)

- ①海野寿康, 仙頭紀明, 粘着力を有する砂の液状化強度に関する実験的研究, 土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度), III-168, pp. 335-336, 2011.9.7(愛媛)
- ②仙頭紀明, 柴田剛, 盛土の排水条件に注目した火山灰質砂質土の非排水繰返し強度, 土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度), III-170, pp. 339-340, 2011.9.7(愛媛)
- ③阿部吉孝, 谷田貝航, 仙頭紀明, 定体積繰返し一面せん断試験機による砂質土の液状化抵抗評価に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成23年度), III-9, 2012.3.3(秋田)
- ④谷田貝航, 阿部吉孝, 仙頭紀明, 積層リング型単純せん断試験の液状化試験への適用性の検証, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成23年度), III-20, 2012.3.3(秋田)
- ⑤長谷川輝, 仙頭紀明, 砂質土の液状化強度に及ぼす締固めの影響, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成23年度), III-10, 2012.3.3(秋田)
- ⑥阿部吉孝, 仙頭紀明, 種々の繰返し直接せん断試験機による液状化抵抗評価, 第47回地盤工学研究発表会, pp. 395-396, 2012.7.14(八戸)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仙頭 紀明 (SENTO NORIAKI)
 日本大学・工学部・准教授
 研究者番号: 40333835

表1 各種試験の項目比較

試験機	項目	操作性	試験コスト	液状化強度	応力-ひずみ	装置の普及
一面せん断試験装置		◎	◎	○	×	◎
単純せん断試験装置		◎	◎	△	○	×
中空ねじりせん断試験装置		×	△	◎	◎	△

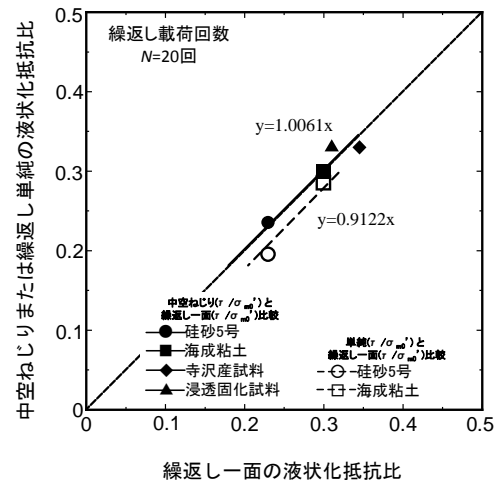


図5 液状化抵抗比の比較