

13. AE計測を併用した中空円筒ねじりせん断試験による 砂の液状化特性に関する研究

溝口 義弘
浅田 毅

要 旨

阪神淡路大震災では、広範囲で種類の異なる地盤材料において液状化が生じ、建物や地中構造物などに大きな被害が発生した。この結果、土の液状化現象が再びクローズアップされ、そのメカニズム等の研究が各方面で行われている。

今回、筆者らは土の液状化試験用にアコースティック・エミッション（AE）を計測できる中空円筒ねじりせん断試験装置を製作し、装置の性能と再現性を確かめるために、珪砂を用いて非排水繰返しねじりせん断試験を行った。その結果、他のせん断試験装置で同じ試料を用いて行われた試験結果と同様な結果を得ることができた。また、試料のせん断中に発生したAEを計測することによって、砂が液状化するまでの降伏曲面の形状変化を推定することができた。

キーワード

液状化／中空円筒ねじりせん断試験／降伏曲面／アコースティック・エミッション／間隙水圧

目 次

1. はじめに
2. 中空円筒ねじりせん断試験装置
3. 試験方法
4. 試験結果
5. 考 察
6. ま と め

13. STUDY ON LIQUEFACTION OF SAND USING HOLLOW CYLINDER TORSIONAL TESTING WITH AE MEASUREMENT.

Yoshihiro Mizoguchi
Tsuyoshi Asada

Abstract

During the Great Hanshin Earthquake, liquefaction of soil was observed on various geotechnical materials, including well graded fill material, and in very extensive areas. The mechanism of liquefaction therefore needs to be studied further for various geotechnical materials.

This paper deals with a performance test of a hollow cylinder torsional test apparatus equipped with Acoustic Emission measurement which was built to study the liquefaction of soil. The liquefaction strength as well as the yielding behavior of uniform sand were studied using this apparatus, and the test apparatus seems to perform well to test the liquefaction strength of soil. Also the AE apparatus seems to indicate well the changes of yield stress during undrained cyclic loading.

1. はじめに

阪神淡路大震災では、地盤の液状化現象によって建物やライフラインなどに大きな被害が発生したことから、それらの良好な耐震性能が要求されるようになってきており、改めて液状化のメカニズムの研究とその対策工法に関わる開発が求められている。そこで、筆者らは、地震による動的繰返し応力を受ける土の液状化のメカニズムを解明するために、地震時の実地盤の応力状態をより忠実に再現できる中空円筒ねじりせん断試験装置を製作した。

現在、液状化解析を行う場合、数多くの数値モデルが提案されているが、そのうち代表的なものの一つとして弾塑性理論がある。その弾塑性理論を基にした液状化モデルを構築する際、非排水繰返し載荷を受けた砂の降伏特性（弾性・塑性領域）を知ることが必要である。これまで、液状化に至るまでの砂の降伏特性について、アコースティック・エミッション（AE）計測を利用した非排水繰返しせん断試験による砂の降伏特性に関する研究とその解析事例^{1), 2)}が発表されて

いる。その研究の中で、砂の降伏特性は、非排水繰返し載荷に伴って降伏曲面が徐々に縮小し、やがては弾性領域がほとんど存在しなくなることが明らかにされている。

今回、製作した中空円筒ねじりせん断試験装置を使って均質な珪砂を用いた非排水繰返しねじりせん断試験を行い、その試験装置の性能と再現性を確認したが、その際、AE計測を利用して非排水繰返し載荷を受けた砂の降伏特性についても検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 中空円筒ねじりせん断試験装置

製作した中空円筒ねじりせん断試験装置と計測制御システムを図-1, 2に示す。供試体に与える鉛直荷重はベロフラムシリンダーにより、また、ねじりせん断力は速度および応力が制御可能なメガトルクモータ³⁾により与える。その鉛直荷重とねじりせん断力は供試体上部に設置された二方向ロードセルにより計測する。ねじり変位はセル外に設置された回転角計により計測する。これらの計測器からの出力は、アンプで増幅しA/D変換器を介してパーソナルコンピュータに収録する。中空円筒供試体の寸法は、内径60mm、外径100mm、高さ190mmである。

供試体内で発生したAEは、ペDESTAL内部に設置されたAEセンサーにより計測する。このAE計測の流れは、物質内部で発生したAEをAEセンサーによ

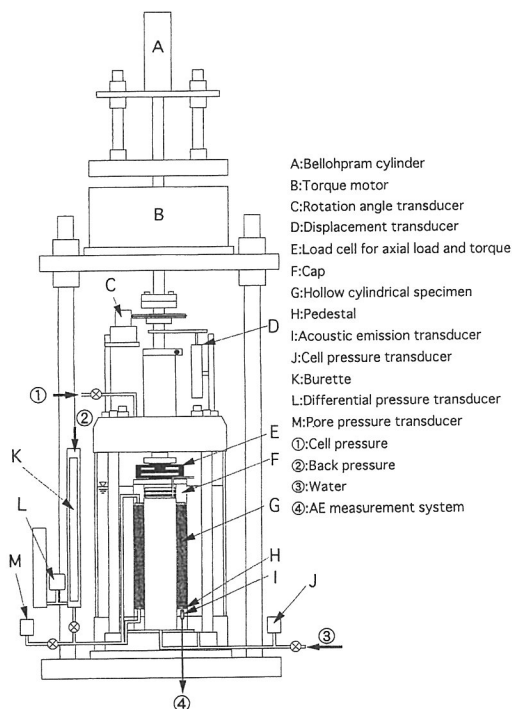


図-1 中空円筒ねじりせん断試験装置

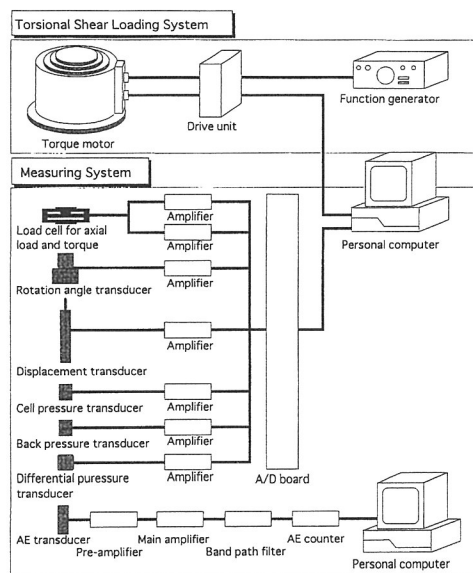


図-2 計測制御システム

て電気信号に変換し、アンプで増幅する。それを、バンドパスフィルターにより環境雑音を除去し、A Eカウンターによって数値化したA E計測数をパーソナルコンピュータに収録する。

3. 試験方法

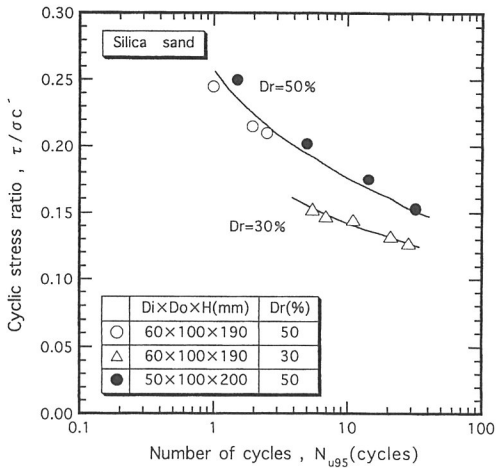
試験に用いた試料は、市販されている岐阜県土岐産の珪砂（珪砂6号と7号を重量比1：1の割合で混合し、細粒分を除去したもの）で、均質な砂である。その試料の粒径加積曲線を図－3に、物理特性を表－1に示す。

供試体は、相対密度が所定の値（30、50％）になるように空中落下法によって作製した。作製した供試体は、炭酸ガス透過→脱気水浸透→背圧（98kN/m²）供給の手順を経て飽和を行い、平均有効主応力P'＝392kN/m²で等方圧密を行った。その後、応力制御により非排水繰返しねじりせん断試験（周波数0.1Hz、正弦波形）を行い、液状化強度を求め試験装置の性能を確かめた。また、ひずみ速度制御により非排水繰返しねじりせん断試験を行い、せん断中のA E計測から非排水繰返し载荷を受けた砂の降伏特性を調べた。

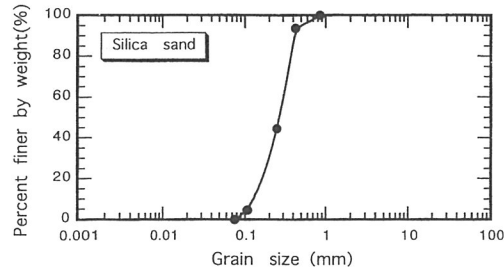
4. 試験結果

応力制御による非排水繰返しねじりせん断試験から求めた液状化強度曲線を図－4に示す。この図は、間隙水圧uが初期拘束圧の95％に達するのに要した繰返

し载荷回数N_{u95}と繰返し応力振幅比の関係を示したもので、本試験装置で得られた結果を○、△印で示す。なお、本試験装置で得られた試験結果の精度を把握するために、供試体の内径寸法が50mmの別の装置で得られた非排水繰返しねじりせん断試験結果⁴⁾を●印で示す。図より、相対密度50％の砂においてメンブレンペネトレーションの影響のためか、本試験装置で得られた液状化強度は多少低い値を示すものの両装置での強度はほぼ同じ値と考えられる。また、相対密度が小さいほど液状化強度は顕著に小さくなっている。これら

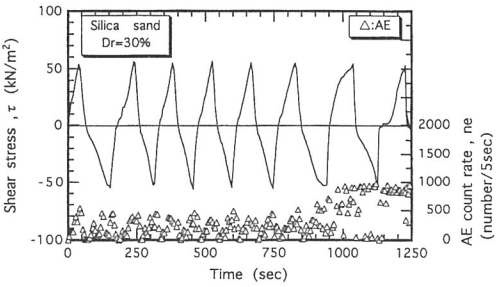


図－4 液状化強度曲線

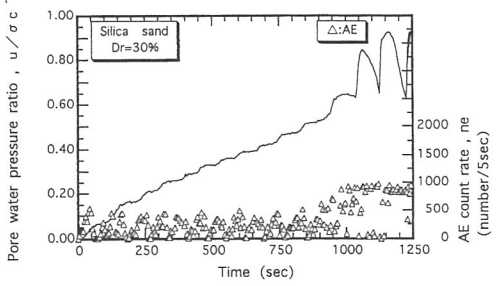


図－3 珪砂の物理特性

表－1 珪砂の物理特性		
Specific gravity	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.635
Maximum void ratio	e_{max}	1.054
Minimum void ratio	e_{min}	0.692
Average grain diameter	$D_{50}(\text{mm})$	0.27
Uniformity coefficient	U_c	2.50
Coefficient of curvature	U_c'	1.11



図－5(a) せん断応力τの経時変化



図－5(b) 間隙水圧比の経時変化

のことから本試験装置で得られた試験結果は妥当なものであると判断される。

次に、非排水繰返し载荷を受けた砂の降伏特性を調べるために行った、ひずみ速度制御による非排水繰返しねじりせん断試験のせん断応力 τ と間隙水圧比の経時変化の一例を図-5(a)、(b)に示す。この図は、相対密度30%の砂の繰返し応力振幅比(0.148)における試験結果で、A E計測率 ne を併記したものである。図-5(a)では、ひずみ速度制御で载荷したため波形は多少不規則であるが、 $t=1000$ (sec.)付近から供試体が軟化挙動を始めていることが分かる。図-5(b)では、供試体が軟化挙動を始めると間隙水圧の変動が激しくなることが分かる。

図-5において1サイクル目のせん断中のせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ 関係とA E計測率 ne ～せん断ひずみ γ 関係を図-6に示す。この図より、せん断応

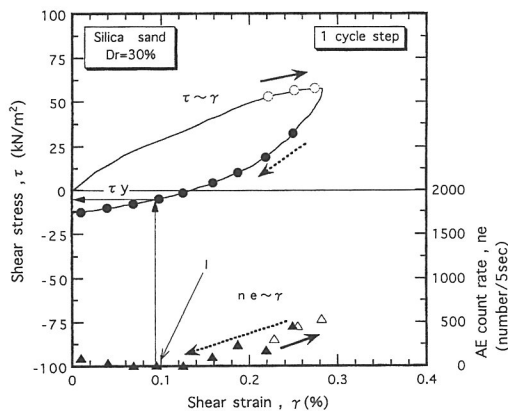


図-6 せん断応力～せん断ひずみ関係とA E計測率～せん断ひずみ関係

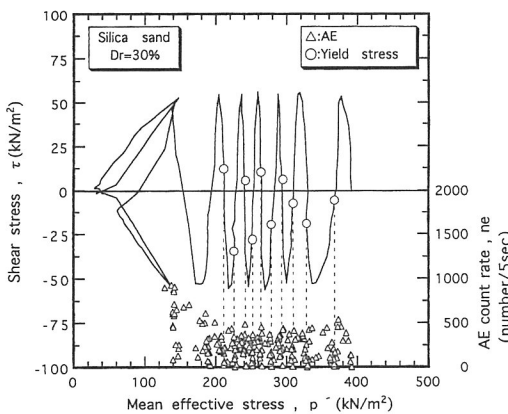


図-7 有効応力経路とA E計測率 $Ne \sim P'$ 関係

力が反転した直後はA Eが発生しているが、ある応力に達するとA Eが発生しなくなり、その後、A Eが再び発生し始めることが分かる。A Eは塑性変形に伴って発生すると考えられるので、A Eが発生し始める点Iに対応する τ を降伏応力 τ_y と考えられる。

繰返しせん断中の有効応力経路とA E計測率 $ne \sim$ 平均有効主応力 p' 関係を図-7に示す。図中における $ne \sim p'$ 関係は、供試体が軟化挙動を起こすまでのものである。この図より、繰返し载荷回数の増加とともに、有効応力が減少していき、7サイクル目の载荷によって軟化挙動を起こしている。A Eは、载荷の開始とともに発生しているが、せん断応力が反転した直後にその発生が減少していくことが分かる。また、せん断応力が負に変わるとA Eが再び発生し始めており、このことから、応力状態が再び塑性領域に入ったものと考えられる。その後のサイクルにおけるA E特性も、1サイクル目と同様に、せん断応力が反転した直後はA Eの発生が止まり、逆方向へのせん断が進行するに伴い、再びA Eが発生している。このことは、繰返しねじり载荷中に、次々と新しい降伏曲面が形成されていることを意味するものである。図中の○印は、A Eが発生し始める応力、すなわち、降伏応力 τ_y を示したものである。

5. 考察

田中らの研究⁴⁾によれば、砂が非排水繰返しせん断を受けて液状化に至る過程での砂の降伏曲面は、図-8に示すように降伏曲面の形状変化が生じることを明らかにしている。この図は、砂が液状化に至る過程を

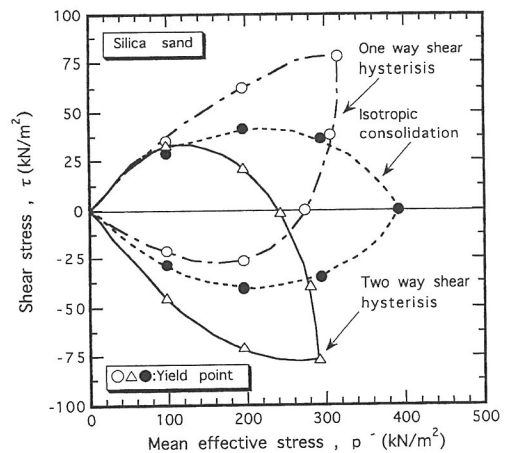


図-8 降伏曲面の比較

想定し繰返し回数を分断した数多くの試験を行い、非排水条件で片振り（○印）及び両振り（△印）単純せん断履歴を受けた砂の降伏曲面の形状変化を示したものである⁵⁾。図から、非排水繰返しせん断履歴を受けた砂の降伏曲面は、せん断履歴を受けた方向に順次移動しながら、間隙水圧の増加に伴って徐々にP'軸原点方向に縮小していくことが分かる。

図-8に示す砂の降伏特性を基に図-7より求まる降伏応力から繰返し载荷中における砂の降伏曲面の変化を推定すると、図-9のようになる。この図より、降伏曲面は、繰返し回数の増加とともに次第に上下方向に広がりがながら、P'軸原点方向に縮小していくことが分かる。このことから、降伏曲面の大きさは、基本的には、直前に受けたせん断履歴の有効応力点に支配されるが、正方向と負方向への载荷を次々と繰返すことにより、次第に直前に受けた履歴の影響だけでは

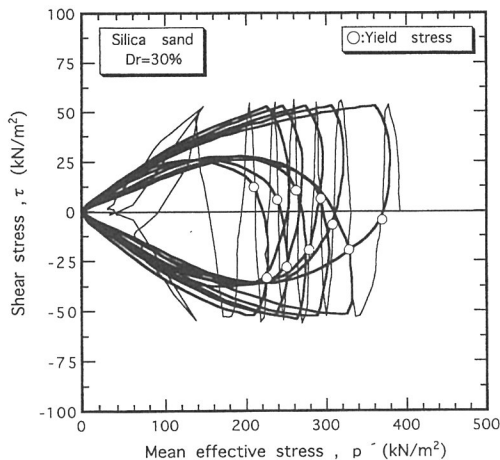


図-9 繰返し载荷時の降伏曲面

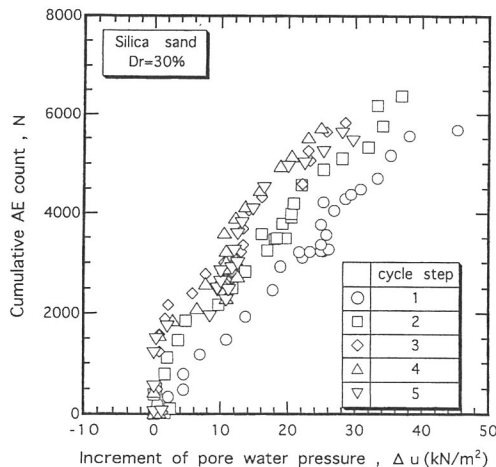


図-10 間隙水圧増分 Δu ～AE計測総数N関係

く、それ以前に受けた履歴による影響も現れてくるものと考えられる。

次に、砂が非排水繰返しせん断履歴を受けて液状化に至る過程で発生する間隙水圧とAEの関係について検討を行う。坂井ら⁶⁾は、砂の非排水繰返し時に発生する間隙水圧は、せん断過程で累積したせん断仕事によって一意的に定まると述べている。AEは、塑性変形に伴って発生するものと考えられ一種の仕事量（エネルギー）でもある。そこで、せん断過程をサイクルごとに分け間隙水圧の増分 Δu とAE計測総数Nを求め、その値をプロットしたものを図-10に示す。この図は、相対密度30%の砂の繰返し応力比（0.148）における試験結果で、5サイクルまでについてまとめたものである。図から、AEが出始める点で間隙水圧が出始める。また、間隙水圧の増分が大きくなると、AEの発生が増加する傾向が見られる。このことから、液状化によって発生する間隙水圧とAEとの間には良い相関関係があるものと考えられる。

6. まとめ

製作した中空円筒ねじりせん断試験装置の性能と再現性を調べるために、供試体寸法の異なる別の装置⁴⁾で実施された非排水繰返しねじりせん断試験で得られた液状化強度と比較した。その結果、ほぼ同じ液状化強度が得られ、本試験装置によって液状化強度を判定することができ、装置の性能と再現性を確認することができた。また、せん断試験中のAE計測によって降伏応力を決定することができた。

概略ではあるが、砂が非排水繰返しせん断を受けて液状化に至る過程で砂の降伏曲面の形状は、正方向、負方向に繰返される载荷に伴い、上下に次々と移動しながら、P'軸原点方向に縮小していく。また、繰返し载荷回数が増加してくると、次第に上下に広がっていくことが分かった。さらに、液状化によって発生する間隙水圧とAEとの間には良い相関関係があることも分かった。

今後、本試験装置を用いて数多くの試験を行い、砂の液状化過程において降伏曲面が変化する過程を確かめ、液状化のメカニズムを解明していきたいと考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重なご意見とご協力をいただいた神戸大学都市安全研究センターの田中泰雄先生はじめ関係者各位に謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 白川、田中、久保、中井(1995) : 繰返し非排水せん断による相馬砂の液状化と降伏曲面の変化、第30回土質工学研究発表会、pp.481～483
- 2) 白川、田中、久保、中井(1995) : 繰返し非排水せん断による砂の変形特性と降伏曲面の変化、土木学会第50回年次学術講習会、pp.304～305
- 3) 山下、鈴木、高橋、千葉(1996) : トルクおよび回転角制御DDモータを用いた中空ねじり試験装置の試作、第31回地盤工学研究発表会、pp.21～22
- 4) 前田(1998) : 非排水繰返しせん断による砂の液状化について、神戸大学大学院修士論文
- 5) 田中、前田、白川、松本(1998) : 非排水せん断履歴を受けた砂の降伏特性について、第33回地盤工学研究発表会、pp.739～740
- 6) 坂井、落合(1985) : せん断仕事を用いた飽和砂の間隙水圧モデル、第20回土質工学研究発表会、pp.615～616