



和田岬沖積砂の凍結サンプリングと降伏応力について

田中, 泰雄
岸本, 八州守
中井, 博之

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 1:83-88

(Issue Date)

1997-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00317443>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00317443>



和田岬沖積砂の凍結サンプリングと 降伏応力について

Frozen Sample of Wadamisaki Alluvial Sand and Yield Stress

田中 泰雄
Yasuo Tanaka
岸本八州守
Yasushi Kishimoto
中井 博之
Hiroyuki Nakai

1. まえがき

阪神淡路大震災においては、神戸市内の臨海部の各地で液状化現象が見られた。人工埋立島の神戸ポートアイランドにおいては大規模な液状化が発生したが、自然地盤である神戸市西部沿岸の和田岬地域においても広く液状化が観察された。神戸市内の自然堆積砂の液状化特性に関しては、沖積砂の堆積状況及び力学特性を含めて未知な部分が多く、乱さない試料による力学試験や原位置試験などの土質調査が広範囲に必要である。本研究は、神戸市内自然地盤の液状化特性研究の一つのステップとして、凍結サンプリングによる自然砂の変形・降伏特性の決定法の問題点について検討したもので、室内で神戸和田岬砂試料に既知の応力履歴を与えた後に凍結し、得られた凍結サンプルについて三軸試験を実施することによって、降伏応力を精度良く決定できるかどうかを調査した。

砂の降伏応力に関する研究として、これまで土の音響エネルギー計測であるアコースティック・エミッション (AE) 計測を併用した室内力学試験を実施し、室内で作成した砂試料については精度良く降伏応力を求めることが可能であることを示した^{1), 2)}。しかしながら、自然堆積状態の砂地盤の降伏応力の決定におけるAE計測法の妥当性を検討するためには、原位置試験或いは凍結サンプルなどの乱さない砂試料の力学試験においてAE計測法の適用性を調査する必要がある。本研究では、以上のような点に着目して、室内で既知の応力履歴を与えて作製した凍結試料について排水三軸試験を実施し、乱さない砂試料についてAE計測による降伏応力の決定方法の妥当性を検討したものである。

2. 凍結試料に関する降伏応力の検討 (Aシリーズ)

(1) 実験方法

実験に用いた試料は、神戸市和田岬地区の地下鉄工事現場から採取した沖積砂であり、炉乾燥後に9.5mmふるいを通したものをを使用した。粒度特性としては、図-1に示すように標準砂と比べて粗粒分が多い砂で、有効径0.48mm、平均粒径約0.9mm、均等係数1.15の粒度を持つ。また土粒子密度は 2.62g/cm^3 、最大乾燥密度 1.67g/cm^3 、最小乾燥密度 1.41g/cm^3 である。実験手順としては、まず試料に応力履歴を与えるために、図-2に示す内側面を十分にグリースした一次元載荷装置(直径150mm)に気乾試料を水中落下法で堆積させ、上

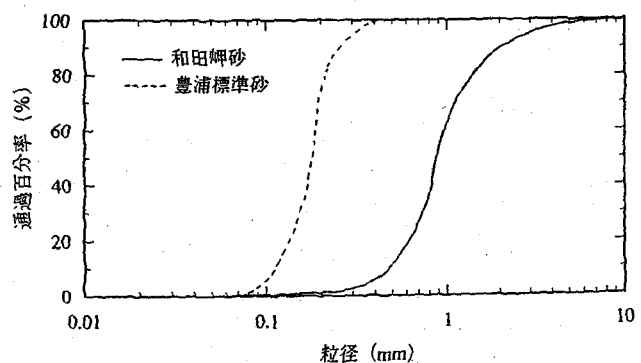


図-1 和田岬砂の粒度曲線

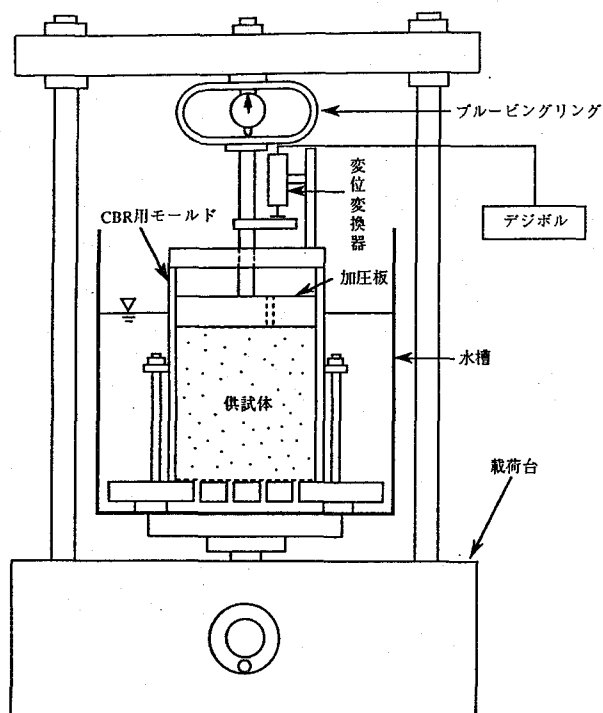


圖-2 一次元載荷裝置

部載荷板を通じて鉛直応力 1.0 kgf/cm^2 まで段階載荷を行い、最大先行応力を与えた状態で4時間放置した。水中落下法で得られた試料の密度は、乾燥密度約 $1.50 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$ であった。先行応力を与えた後、荷重を除荷して下部より脱水を行い、不飽和状態となった試料を載荷用モールドに入れたままで冷凍庫に移し、凍結試料を作成した。試料が凍結した後、凍結ブロックから粘性土と同様な手順でストレートエッジを用いて高さ 100 mm 、外径 50 mm の三軸供試体を切り出した。作製した凍結供試体を三軸セルに移動して、負圧 0.1 kgf/cm^2 の状態で約2時間放置して融解し、炭酸ガスの流入、脱気水の透過を行って飽和させた。その後、拘束圧 0.1 kgf/cm^2 の状態から種々の応力経路に沿って排水状態で載荷を行った。なお、三軸試験は図-3に示すAE計測が可能な装置を用いている。また、試料が粗砂であるため、体積変化測定にはメンブレン貫入量の補正を行っている。

図-3 三軸試験装置及びAE計測装置

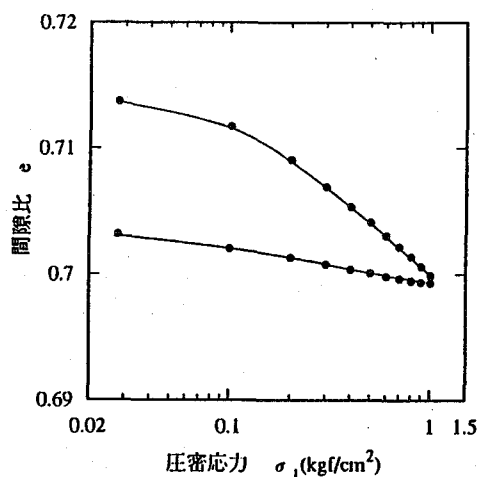


図-4 間隙比～圧密応力関係

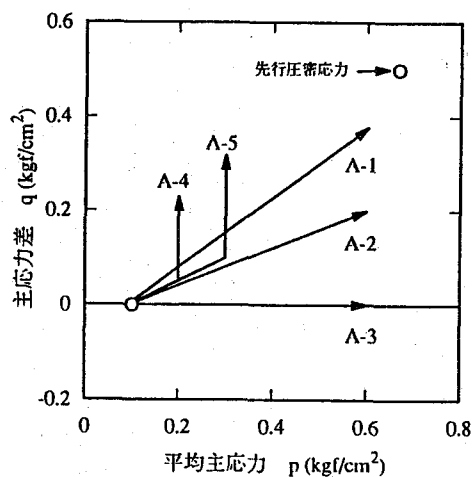


図-5 せん断応力経路 (Aシリーズ)

(2) 実験結果

図-4は一次元載荷装置において先行応力を与えた場合の圧縮曲線である。図より、鉛直応力が 0.12 kgf/cm^2 を越えたあたりから圧縮性が増加し、ほぼ直線的に変化している。圧縮指数としては $C_c = 0.014$ となっており、これまでの実験試料である相馬砂の圧縮指数 $C_c = 0.022 \sim 0.056$ の値に比べて、圧縮性が低いものとなっている。

図-5は凍結試料を融解後に三軸装置で排水載荷した場合の応力経路を示したものである。図のように、等方載荷、異方圧密、平均主応力一定せん断の載荷

-84-

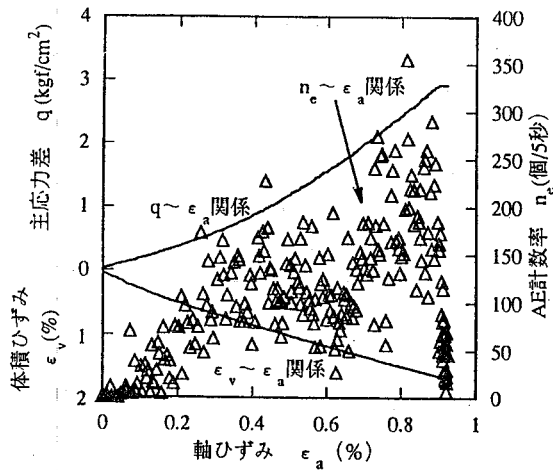


図-6(a) 異方圧密試験結果 (A-1, 全体図)

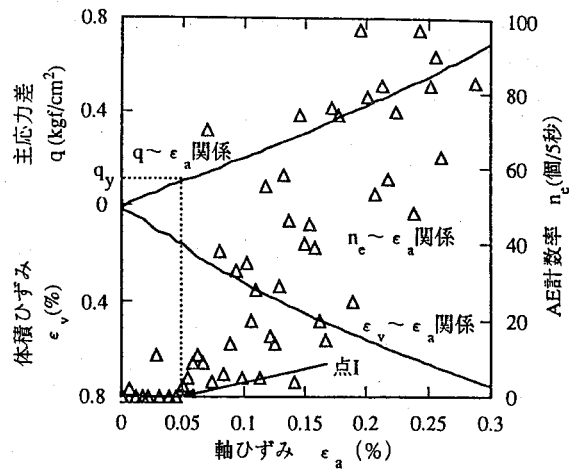


図-6(b) 異方圧密試験結果 (A-1, 微小ひずみ部分)

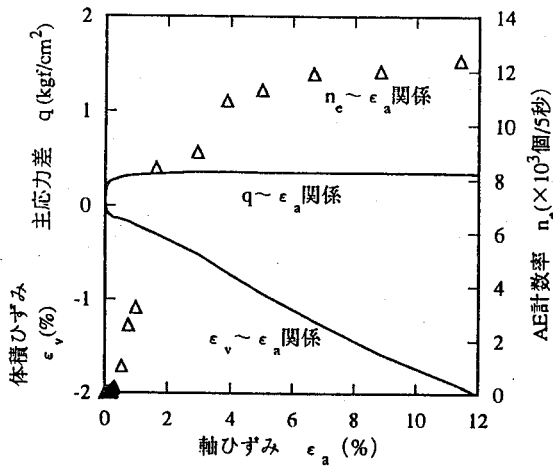


図-7(a) p一定圧縮試験結果 (A-4, 全体図)

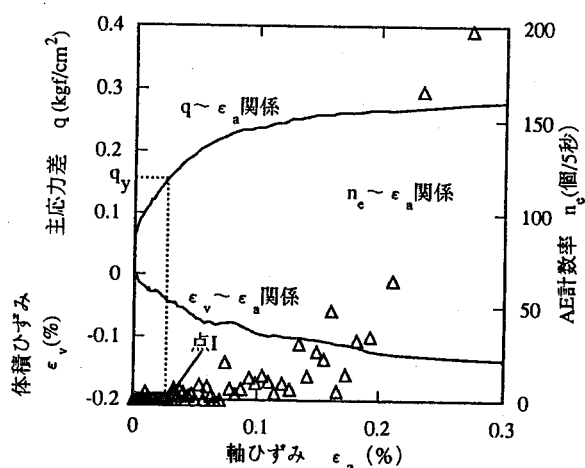


図-7(b) p一定試験結果 (A-4, 微小ひずみ部分)

経路に沿って排水条件で応力制御の载荷を行った。図中の異方圧密経路A-1に沿って载荷した場合の、主応力差～軸ひずみ関係、体積変化、AE計測結果を図-6(a)に示す。図-6(a)から明らかなように、異方圧密時には砂は硬化現象を示し、主応力差～軸ひずみ関係は非線形なものとなり、体積変化が継続している。一方、AEについては、载荷により微小ひずみが生じた後にAEが増加していることが分かる。図-6(a)の微小変形部分を拡大したものが図-6(b)であり、図のように载荷に伴って、ある程度の軸ひずみが生じるまでAEは発生せず、その後連続的なAEが計測されている。このAE発生に対応する応力を降伏応力とした。同様に平均主応力一定せん断の経路で载荷した実験結果を示したものが、図-7(a),(b)である。先の図-6と同様に、供試体は微小ひずみの範囲では、ある程度の応力とひずみが増加するまではAEは発生していないが、その後、AEが増加することが分かる。全ての载荷試験から得られた降伏応力をもとに降伏曲面を描いたものが、図-8である。図より、凍結試料の降伏曲面は先行応力点に比して大幅に小さくなっており、従来の実験結果とは大きく異なる結果となっている。

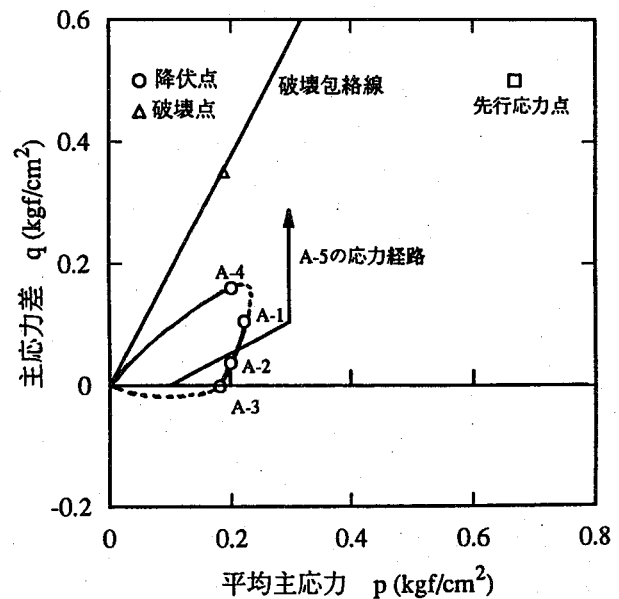


図-8 凍結試料の降伏曲面

従来の実験²⁾では、三軸供試体に先行応力履歴を与えて、三軸セル内の状態を変化させることなく、各種のせん断試験を実施している。その結果、先行応力を受けた砂の降伏曲面の大きさは先行応力点を通るような形状が得られていた。これに対し、本実験シリーズでは、先行応力を与えた後に完全に応力を解放した状態で凍結作用を与え、凍結ブロックより新たに三軸供試体を切り出している。非凍結試料との実験過程の相違は、応力解放後の凍結作用と凍結サンプルの成形である。従って、凍結試料の降伏応力の大幅低下については、凍結作用の与え方或いは試料切りだし方法の影響などを検討する必要があると考えられる。なお、 $p=0.2\text{kgf/cm}^2$ の主応力一定せん断試験から得られた内部摩擦角は 45.6° であった。

3. 非凍結試料に関する降伏応力の検討 (Bシリーズ)

上記の結果は、凍結試料では従来の室内作成試料と比べて大幅な降伏応力の低下を示した。その原因については前述のように、凍結作用・試料切りだし方等を検討する必要があるが、今回用いた和田岬砂は、従来の相馬砂・マサ土と比べて物理・粒度特性が異なるため、従来の実験方法と同様に非凍結状態の和田岬砂について、シリーズAの凍結砂と同様な応力履歴を三軸セル内で与えた後に種々の応力経路で排水載荷試験を実施し、AE計測で降伏応力を決定することとした。

(1) 実験方法

試料作成方法としては、三軸モールド内で空中落下法で供試体を作製し、炭酸ガス流入、脱気水透過を経て供試体を飽和させた後、異方圧密履歴を与えた。供試体密度としては約 $1.55\sim 1.58\text{g/cm}^3$ で、凍結試料に比べて若干密度が大きくなる結果が得られた。圧密履歴としては、土圧係数 K を 0.5 と仮定して、最大鉛直応力が 1.0kgf/cm^2 まで段階載荷を行い、最大先行応力状態で約 1.5 時間放置後、載荷と同じ経路で除荷した後に、先の実験シリーズと同様な応力経路で等方及び異方圧密、主応力一定せん断などを排水条件で実施した。

(2) 実験結果

まず、 $K=0.5$ の異方圧密履歴を与えた場合の試験結果を示すと図-9のようである。また異方圧密時のAE計測結果も同図に示されている。圧縮曲線から得られる圧縮指数 C_c の値は 0.012 となり、一次元載荷装置で得られた値と同じであった。また、 $K=0.5$ の異方圧密時の軸ひずみと体積ひずみ計測結果から水平方向のひずみを算定した結果、鉛直変位の約半分程度の水平変位が発生したことが分かった。従って、和田岬砂について一次元載荷装置で与えたと同じ応力履歴を再現するためには、静止土圧係数として $K=0.5$ より小さな値を採用すべきである。

次に、異方圧密履歴後に図-10に示す種々の応力経路に沿って排水載荷を行い、先のシリーズと同様に応力・ひずみ計測、AE計測を行った。図-10中のB-1に示す異方再圧密時に得られた軸ひずみ、体積変化、主応力差、AE計測結果を示すと図-11(a)であり、微小ひずみ部分を拡大したものが図-11(b)である。図から分かるように、主応力差～軸ひずみ及び体積変化～軸ひずみ関係は凍結和田岬砂とはほぼ同様な傾向が得られているが、AE計測から求められる降伏応力の値は凍結和田岬砂に比べて大幅に増加している。また、主応力一定せん断試験時の応力～ひずみ関係を示したものが、図-12である。図から分かるように、破壊強度には大きな違いはないが、微小ひずみ部分の応力～ひずみ関係に違いがあり、非凍結試料の方が剛性が高くなっている。なお、圧縮・伸張試験で得られた内部摩擦角はそれぞれ 40.3° と 35.7° である。

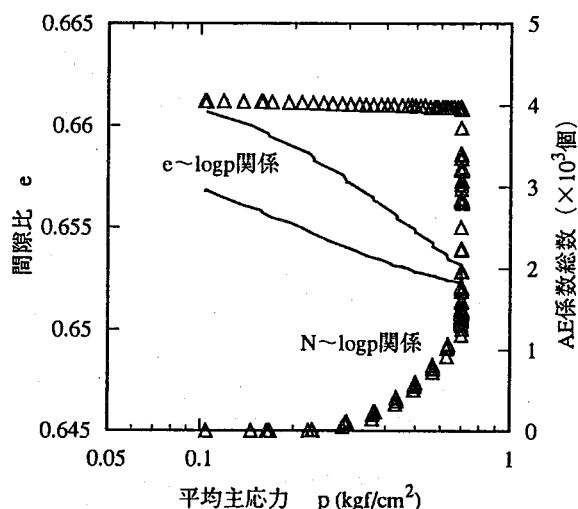


図-9 非凍結試料の圧縮曲線及びAE計測結果

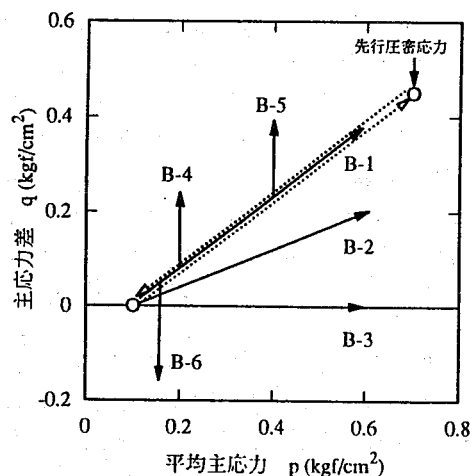


図-10 せん断応力経路 (Bシリーズ)

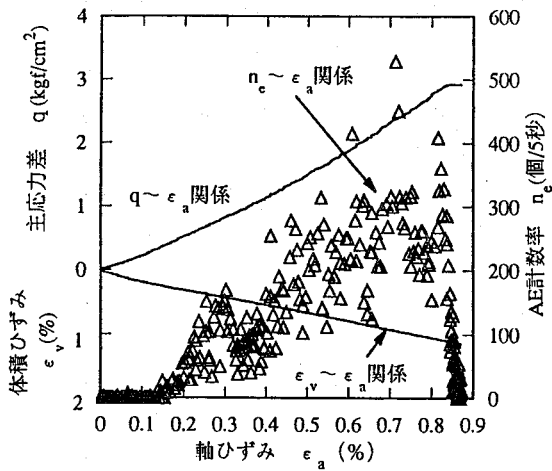


図-11(a) 異方圧密試験結果 (B-1, 全体図)

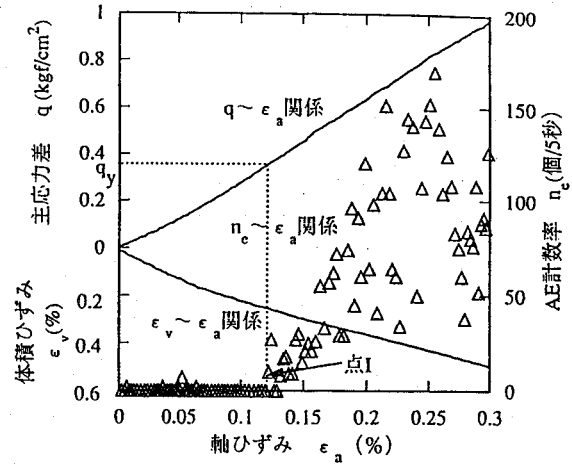


図-11(b) 異方圧密試験結果 (B-1, 微小ひずみ部分)

次に、非凍結試料から得られた降伏応力を基に、降伏曲面を求めて凍結試料のものと比べたものが図-12である。図より、非凍結試料の降伏曲面の大きさは凍結試料のものより大幅に拡大していることが分かるが、注目すべき点は降伏曲面の形状は先行応力点を通していないことである。

ここで、従来から得られている降伏曲面の形状と今回の実験結果とを比較するため、異方圧密履歴を受けたまさ土の降伏曲面³⁾と今回の降伏曲面とを同じ図上で比較したものが、図-13である。降伏曲面の形状及び大きさは、試料の相違や先行応力・応力履歴の差、試料の破壊強度などによって変化するため、図では偏差応力及び平均主応力をそれぞれ破壊応力・先行最大平均主応力で除して、応力で正規化した降伏曲面を比較している。図から分かるように、まさ土の降伏曲面は先行応力点を通していているのに対して、非凍結和田岬砂の降伏曲面は先行応力点の約85%程度の位置に描かれ、凍結和田岬砂のそれは他に比して非常に小さいものとなっている。

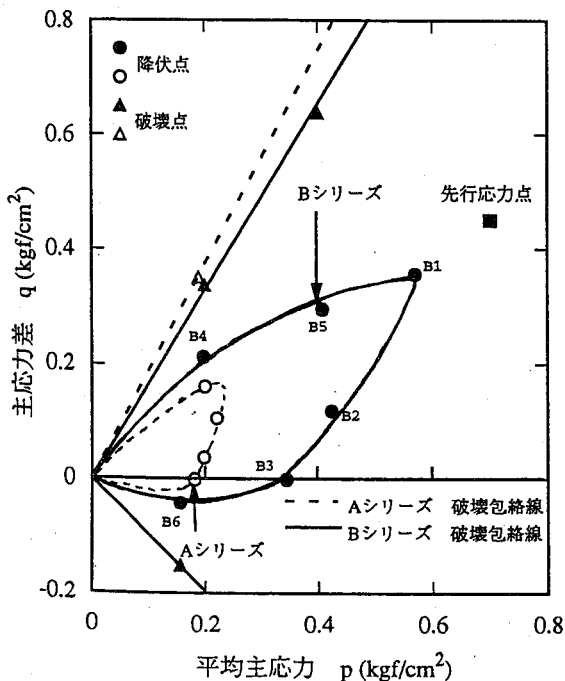


図-12 非凍結試料の降伏曲面

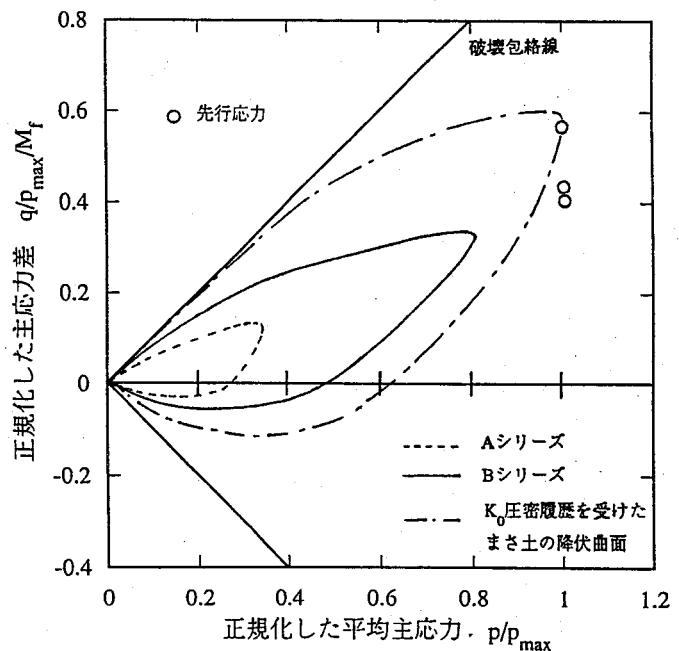


図-13 和田岬砂とまさ土の降伏曲面の比較

4. 考察及び結論

今回の実験シリーズから下記の2点が明らかとなった。

- 1) 室内で一次元応力載荷履歴を与え、応力解放後の試料凍結を経て、切り出した凍結供試体成形について降伏応力をAE計測で測定した場合、一次元載荷で与えた先行応力はほとんど消滅していることが判明した。
- 2) 和田岬砂を凍結させることなく、室内三軸セル内で鉛直方向に 1 kgf/cm^2 の載荷履歴を与えた場合、最大先行応力点から約85%あたりに位置する降伏曲面の形状が得られた。

以上の結果は、従来の相馬砂やまさ土に関する降伏曲面の研究成果とは異なるものである。すなわち、従来用いた砂試料では、降伏曲面は最大先行応力点を通過或いは応力点を超えるような形状を示した。しかし、非凍結の和田岬砂では最大先行応力の約85%あたりに位置する降伏曲面となっている。従って、和田岬砂のような自然堆積砂の降伏曲面をAE計測で決定する手法を確立する上で、さらに検討すべき点を幾つか示唆するものである。

まず、凍結によるサンプリング方法であるが、今回は完全に応力を解放した状態で試料を凍結したために、粒子間接点で凍結現象が生じたときは粒子間力が無いために、粒子表面での水の氷結による膨張は粒子構造及び先行応力の消滅を生じる可能性がある。現地盤での凍結サンプリングでは、上載荷重がある状態で凍結するため、今回用いた凍結手法とはこの点で異なる。

また、今回は和田岬を採取した深度を考慮して、最大鉛直応力が 1.0 kgf/cm^2 と低い応力を与えた。これに対して、従来の研究では最大先行応力の値を $4.0\sim 6.0\text{ kgf/cm}^2$ まで与えていた。和田岬砂は粒子も硬く粗粒であるため、外力に対して粒子構造の再配列や粒子破碎を生じるような応力状態も大きくなるものと考えられる。従って、非凍結和田岬砂の降伏曲面が最大先行応力の約85%あたりに位置するものとなった原因は、低応力での圧密に起因する可能性がある。

したがって、凍結サンプルによる原位置砂の降伏応力の決定法の研究について、上記のような点について今後の検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Tanaka, Y. & K. Shirakawa : Evolution of Yield Locus during the Undrained Cyclic Loading of Sand, First Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng. (IS-Tokyo '95), Vol.1., 257-264, 1995
- 2) Tanimoto, K. & Tanaka, Y., : Yielding of Soil as Determined by Acoustic Emission
Soils & Foundations Vol.26, No.3, p69~p80, 1986
- 3) Tanimoto, K., Tanaka, Y., K. Kagotani, N. : The Effect of Pre-Shearing on Yield Locus of Sandy Soil, Proc. 8th Asian Reg. Conf., on SMFE, Vol.1, p105~p108, 1987