

単純せん断試験による異方圧密粘土の繰り返しせん断強度特性の評価

名城大学大学院 学生会員 福沢宏樹
名城大学 国際会員 小高猛司・板橋一雄
JR 東海コンサルタント 正会員 加藤信二郎

1. はじめに

粘性土地盤の地震時挙動を予測する場合に、砂地盤の液状化解析で用いられるような繰り返し載荷挙動を詳細に記述するモデルが適用されることは少ない。現状の地震応答解析では、比較的詳細に解析する場合であっても、動的変形試験によって得られた等価剛性と履歴減衰率の非線形性を考慮する程度である。それは、粘性土の場合には、液状化砂のように完全に有効応力を消失して大変形に至ることが少ないため、通常の地震レベルでは詳細なモデル化までは必要なかったからとも考えられる。しかし、関東大震災における埼玉県中川低地での家屋被害¹⁾、あるいは安政南海地震における東大阪での家屋被害²⁾など、歴史地震を繙けば鋭敏粘土地盤特有の甚大な被害報告もみられ、このような粘土地盤の地震被災メカニズムを解明するためには、粘性土の動的性質を詳細に調べた上で、その特性を記述構成モデルを構築することが必要である。特に、継続時間が長く、かつ長周期である海溝型巨大地震においては、鋭敏な自然堆積粘土に関して構造劣化に伴う強度低下が危惧される。今後、粘性土を含む自然地盤の地震時挙動をより詳細に検討するためには、小ひずみ～大ひずみの領域を包含した、繰り返し載荷時の粘性土の動的特性をモデル化してゆく必要がある。

粘性土の動的性質を評価するために繰り返し三軸試験が実施されることが多いが、三軸試験では応力～ひずみ関係、有効応力経路ともに、圧縮と伸張の両過程で現れる挙動に大きな差が生じ、原地盤内での繰り返し挙動を正確に表現しているとは言い難く、構成モデルの開発に用いるには障壁が多い。さらに、原地盤と同じ異方圧密応力状態からの繰り返し載荷ができないことも繰り返し三軸試験の欠点である。本研究では、それら繰り返し三軸試験の欠点を補うべく、繰り返し単純せん断試験を用いた粘性土の動的構成モデルの構築を目標としている。単純せん断試験は、異方圧密応力状態を初期状態にして、せん断応力のみを繰り返し負荷することが可能であり、原地盤の繰り返し載荷挙動を再現しやすい利点がある。本論文では、新たに開発した単純せん断試験装置の概要とそれを用いた粘性土の繰り返し単純せん断試験結果を示す。

2. 単純せん断試験装置の概要

写真-1 および写真-2 は、それぞれ本研究で開発した単純せん断試験装置の全景およびセル部を示す。また、図-1 は単純せん断試験装置の主要部の説明図である。載荷機構にはパルスモーターとハーモニックドライブ減速機を用いており、広範なせん断ひずみ速度(0.002～0.6%/min)での試験が可能である。また、繰り返し載荷の反転時には、ほとんどバッククラッシュが生じない。また、荷重の計測には、垂直荷重、水平荷重ともに内部ロードセルを用い、また水平変位は上部ペダスタルの移動量をギャップセンサーで計測することにより精度を高めている。



写真-1 単純せん断試験機全景

供試体寸法は直径 60mm、高さ 30mm としており、シンウォールサンプラーで採取した自然堆積粘土での試験が無理なく実施できる。上下ペダスタルには刃付のポーラスストーンを設置しており、供試体との摩擦を十分に確保した上で、上部ペダスタルを水平移動することによって単純せん断試験を行う。なお、せん断

Evaluation of cyclic shear strength of anisotropically consolidated clay using by simple shear test:

Hiroki Fukuzawa, Takeshi Kodaka, Kazuo Itabashi (Meijo University) and Shinjiro Kato (JR-Central Consultants)

中の単純せん断モードの実現するために、写真-2に示したように、多層スリップリングで供試体を拘束してせん断を行う。すなわち、メンブレンを被せた供試体の外側に、供試体径と同じ内径の穴を持つ厚さ 1mm のドーナツ形状の多層スリップリングを積層させて設置し、供試体側面形状を拘束しながらせん断している。また、せん断時には非排水条件による定体積せん断を実施しているが、さらに鉛直荷重軸を固定することにより、異方圧密条件下でも精密な定体積せん断を可能としている。

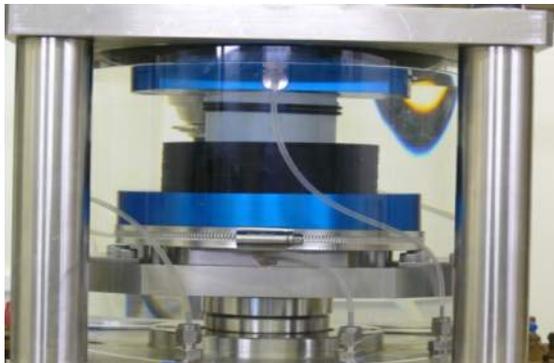


写真-2 セル内の様子

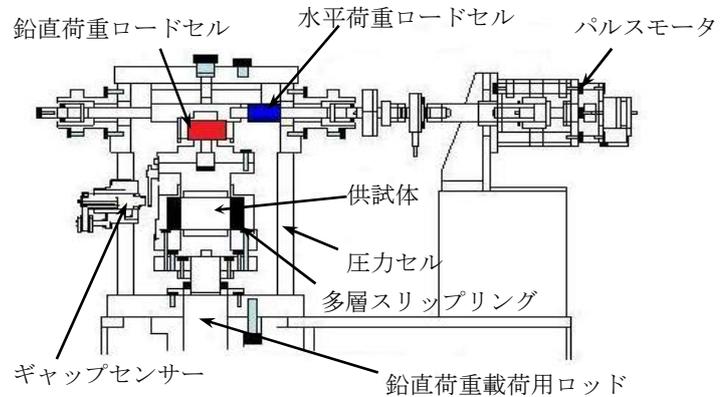


図-1 単純せん断試験装置の主要部の概略図

3. 供試体の作製手順および実験手順

本論文の実験で用いた試料は、再構成の有楽町層粘土（以下、再構成有楽町粘土と呼ぶ）と東大阪地域で採取した不攪乱状態の自然堆積粘土（以下、不攪乱赤井粘土と呼ぶ）である。再構成有楽町粘土は、東京湾で浚渫した粘土を 420 μ m フレイによる裏濾しによって貝などの固形物を取り除き、蒸留水を加えてスラリー状にして、ミキサーで十分に攪拌した。その後、直径 20cm の予備圧密容器内にて、24 時間真空ポンプを用いて脱気した後、5 日ほどかけて徐々に圧密荷重を増加させてゆき、最終的には 100kPa の圧密荷重を作用させ 2 週間ほど圧密させた。なお、再構成有楽町粘土の物理特性は、液性限界 85.5%、塑性限界 31.0%、塑性指数 54.5 であった。一方、不攪乱赤井粘土は、大阪府大東市赤井においてシンウオールチューブで採取したものであり、内湾の堆積環境で形成された Ma13 沖積粘土であり、この付近の東大阪粘土は鋭敏性が高いことが知られている³⁾。

供試体は標準圧密試験と同様に、直径 60mm のカッターリングを用いて円柱型に成形した後、試験装置に設置する。セル内に供試体を設置し、二重負圧法による飽和化を行った後、最終的に表-1 に示す圧密条件で 20 時間圧密を行った。Case A の等方圧密 ($K_0=1$) の場合には、表に示す等方応力をすぐに作用させたが、Case B,C,D の異方圧密 ($K_0=0.5, 0.66$) の場合には、圧密過程においても比較的大きなせん断応力が作用するために、図-2 に示すように数段階で表-1 の所定の応力状態に到達させた。最終応力状態以外では、図中の各プロットの応力状態にて、4 時間ずつの圧密を行った。また、すべての試験で背圧は 200kPa としている。前述のように、単純せん断過程は、軸変位固定の非排水定体積せん断条件で行っており、すべての試験において、ひずみ制御方式で実験を実施している。せん断ひずみ速度は、単調荷重試験では 0.1%/min、繰返し荷重試験では 0.5%/min である。

表-1 各試験 Case の圧密条件

Case	試料	K_0	σ_1'	σ_3'	σ_m'
A	再構成有楽町粘土	1.0	200	200	200
B		0.66	300	200	233
C		0.5	400	200	267
D			200	100	133
E	不攪乱赤井粘土	1.0	60	60	60
F		0.5	80	40	53

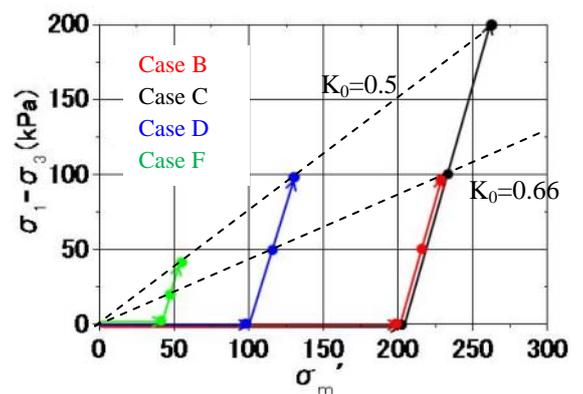


図-2 圧密過程における有効応力履歴

4. 試験結果

4.1 再構成有楽町粘土

図-3 は初期有効拘束圧 100, 200, 300kPa で等方圧密後に単調載荷単純せん断試験をした結果に加えて, Case B, C, D の異方圧密応力状態からせん断した場合の試験結果もあわせて示す。なお, 200kPa で等方圧密した場合が Case A に相当する。図-3(a) のせん断応力～せん断ひずみ関係を見ると, 全試験において, せん断応力は単調に増加しており, 明確なピーク強度は確認できない。図-3(b) の有効応力経路を見ると, 等方, 異方の圧密条件に関係なく, 破壊応力比は 0.6 と比較的小さい値を示している。図-4 は等方, 異方の両圧密条件による差を明確に示すために, せん断応力の代わりに偏差応力テンソルの第 2 不変量 $\sqrt{2J_2}$ (以下, 偏差応力と呼ぶ) を用い, せん断ひずみの代わりに偏差ひずみテンソルの第 2 不変量 ε_s (以下, 偏差ひずみと呼ぶ) を用いて示した実験結果である。有効応力経路を見ると, 異方圧密応力を初期状態とする Case B, C, D では, 偏差応力はそれほど変化せずに限界状態線まで推移していることがわかる。特に, $K_0=0.5$ の Case C, D では, 偏差応力はせん断に伴い低下する傾向が観察されている。

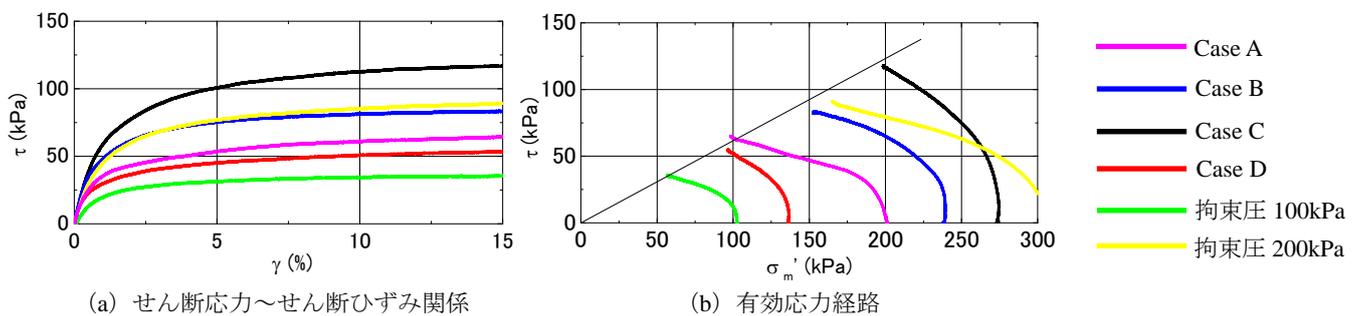


図-3 単調載荷試験結果 (再構成有楽町粘土)

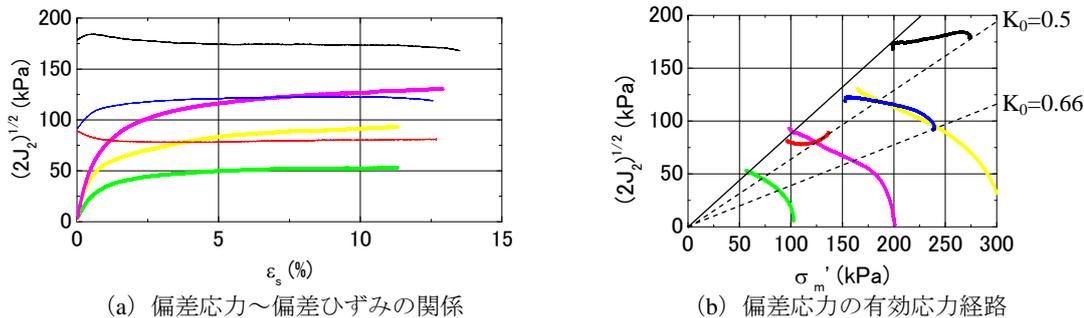


図-4 単調載荷試験結果 (再構成有楽町粘土)

表-1 に示す Case A～D の 4 種の等方あるいは異方圧密応力を初期状態として, それぞれ 3 つの繰返しせん断応力比 (τ/σ'_m) を用いて繰返し単純せん断試験を実施した。図-5～図-8 にそれぞれ, Case A～Case D の試験結果を示す。いずれの図においても, 上段がせん断応力～せん断ひずみ関係 (以下, 応力～ひずみ関係と呼ぶ), 中段がせん断応力～平均有効応力で表した有効応力経路 (以下, 通常の有効応力経路と呼ぶ), 下段が偏差応力～平均有効応力で表した有効応力経路 (以下, 偏差応力の有効応力経路と呼ぶ) である。応力～ひずみ曲線, 通常の有効応力経路とともに, 繰返しせん断に伴い, せん断ひずみの増加や平均有効応力の減少は, せん断応力の方向によらず均等に進んでいる。特に, 有効応力経路はきれいな上下対称を示しており, この単純せん断試験においては, 繰返し載荷によって粘土が徐々に有効応力を失ってゆく挙動を, 精度良く観察できているものと考えている。いずれの実験においても, せん断ひずみの両振幅が 10% を超えた時点で実験を終了しているが, せん断ひずみは徐々にまだ増加し続けていることがみてとれる。また, 平均有効応力も徐々にではあるが減少し続けているが, ゆる詰め砂のようにゼロまで到達することはなく, 比較的大きな値で収束しつつある。有効応力経路に描かれている直線は, 単調載荷単純せん断試験で得られた破壊線である。単調載荷では, 試験条件によらず破壊線は同じ傾きであると判断できたために, これらの図でも全 Case で同じ傾きの破壊線を示している。通常の有効応力経路を見るといずれの Case においても, せん

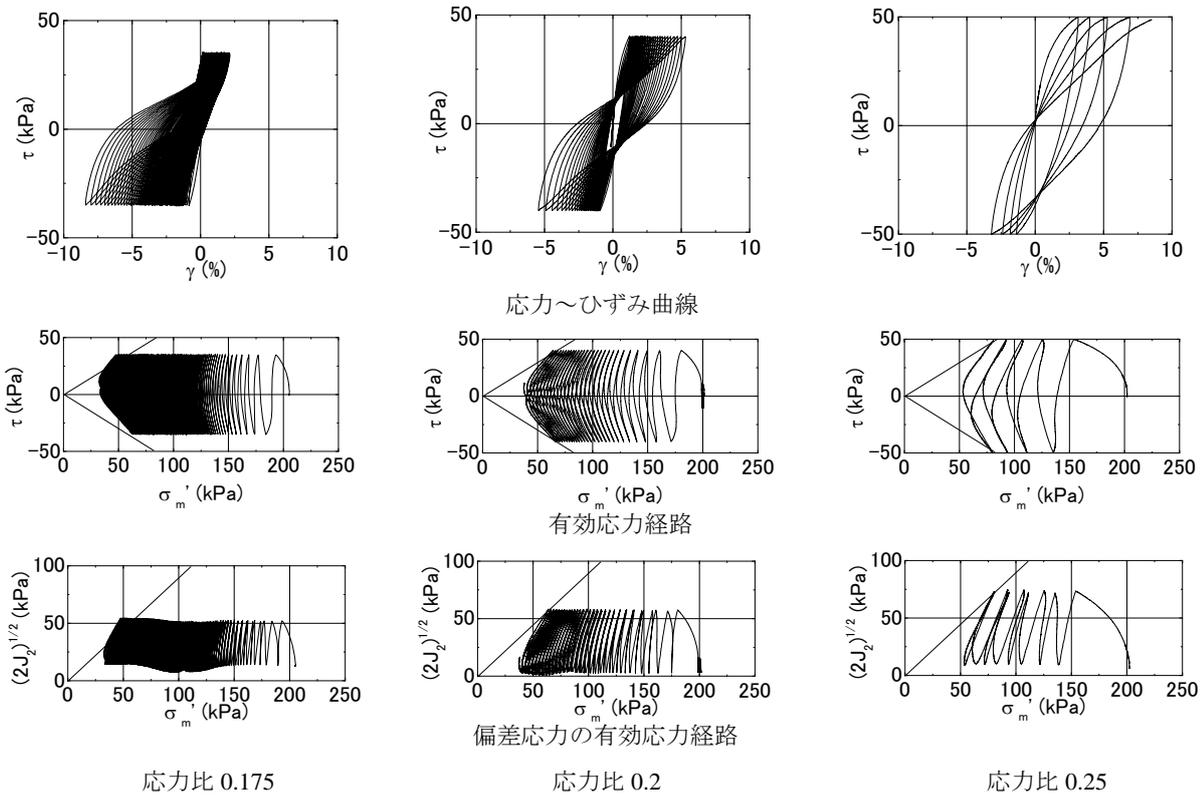


図-5 Case A の繰返し載荷試験結果

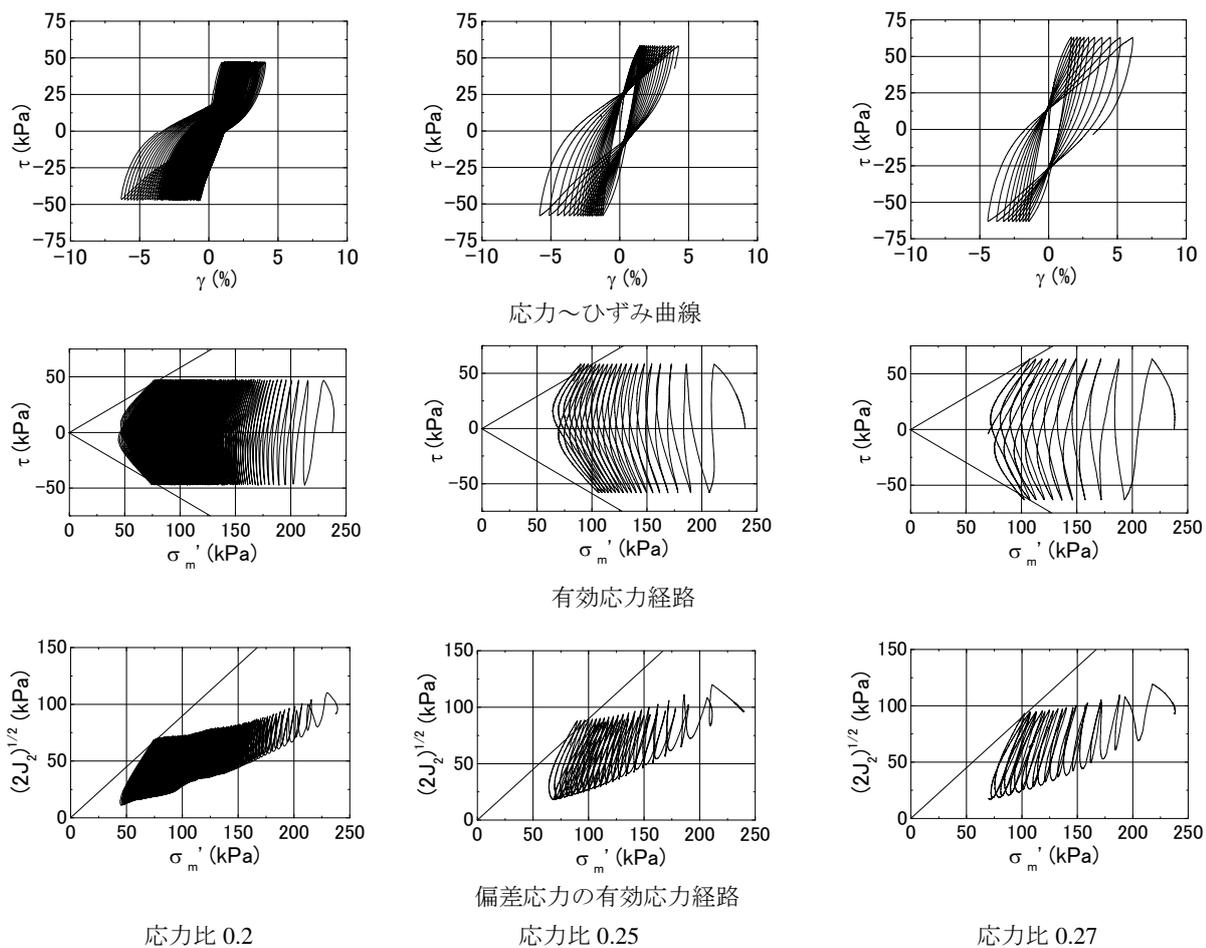


図-6 Case B の繰返し載荷試験結果

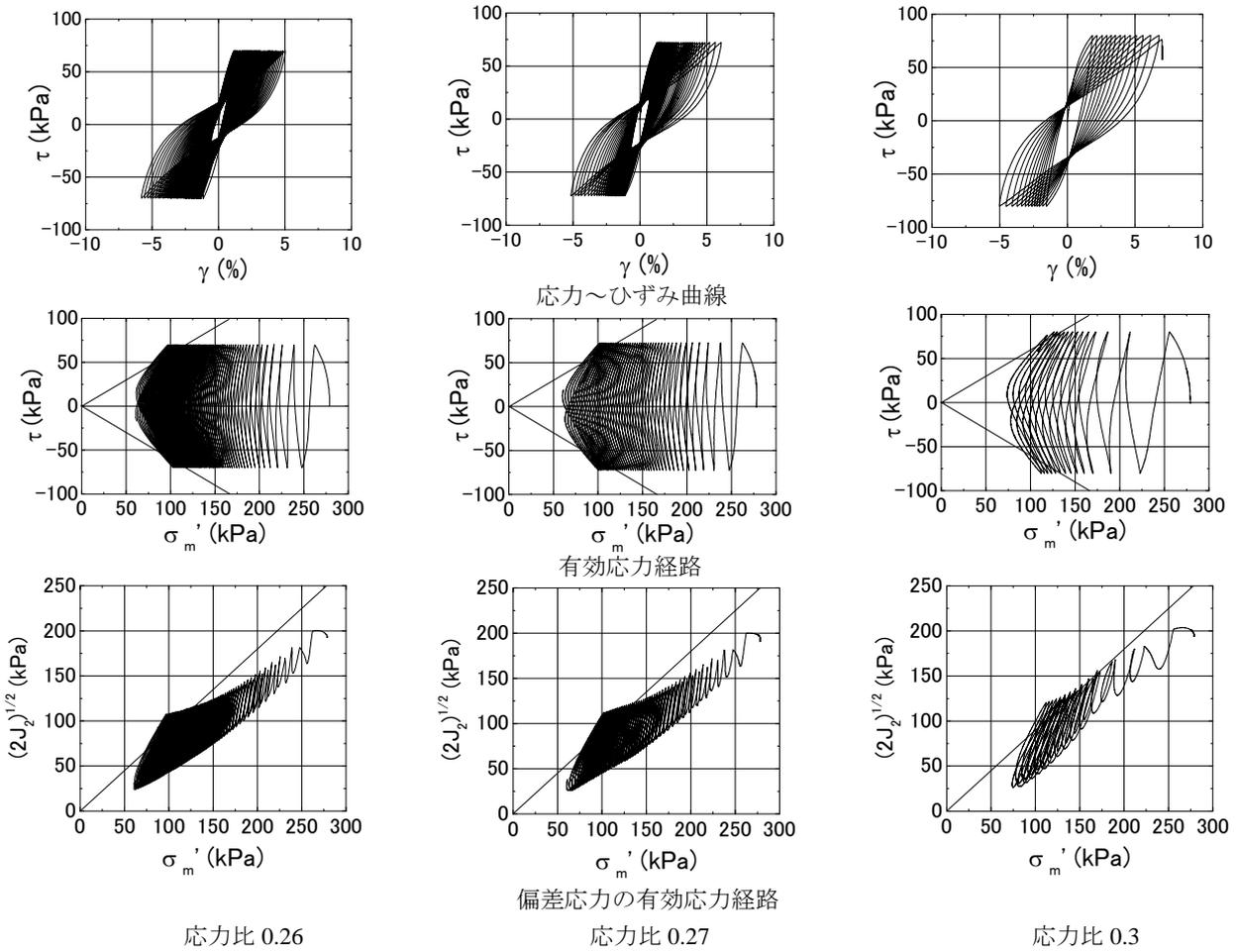


図-7 Case C の繰返し載荷試験結果

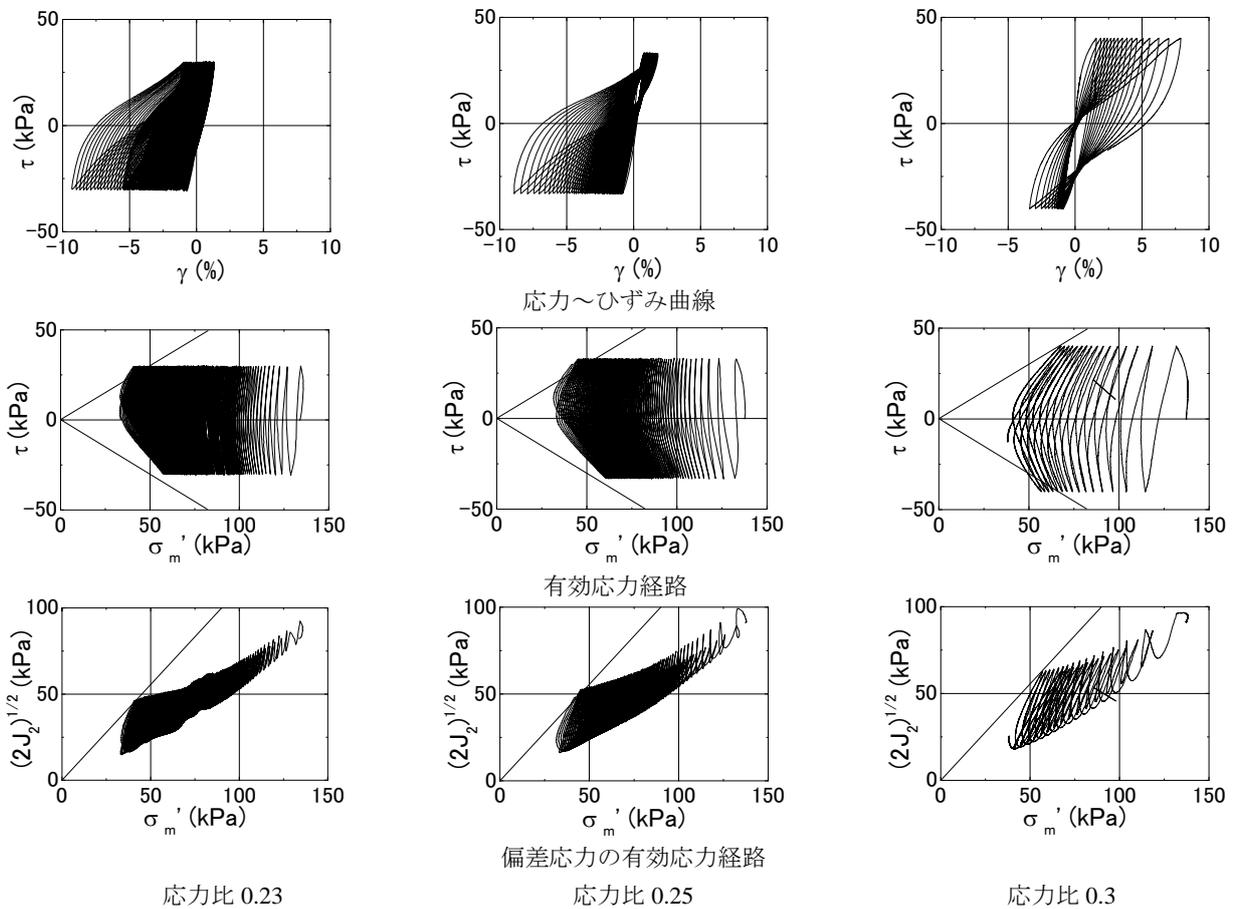


図-8 Case D の繰返し載荷試験結果

断ひずみの増加につれて、有効応力経路は2本の破壊線に挟まれた領域内で徐々に傾きを大きくしながら減少してゆく挙動を見せており、密づめ砂で観察されるサイクリックモビリティに類似している。偏差応力の有効応力経路では、特に異方圧密応力を初期状態とする Case C においては、繰り返し载荷に伴い、徐々に等方応力に近づいている様子が良くわかる。特に注目したいのは、比較的大きな繰り返し応力比の繰り返しせん断応力を作用させても、载荷初期にはそれほど大きな偏差応力の変動は見られないが、繰り返し载荷が進行すると、相対的に等方的な有効応力状態に近づくために、偏差応力の変動も多くなることである。载荷の進行に伴い偏差応力の有効応力経路は、破壊線の下側から徐々に近づくように推移し、有効応力状態が破壊線を超える部分が目立ち始める。以上のように、通常の有効応力経路では、初期の応力状態による違いはないものの、偏差応力の有効応力経路をみると、両者に大きな差があることがわかる。

4.2 不攪乱赤井粘土

サンプリングした粘土試料の中から、深度 9.3m 付近、鉛直有効土被り圧 74.4~78.3kPa、含水比約 85% の試料を使用した。この試料には細かい貝殻が多く含まれていた。初期の有効応力状態を等方圧密条件とする Case E の場合には、鉛直有効土被り圧を勘案して初期有効拘束圧 60kPa とした。異方圧密条件の Case F としては、原地盤の異方応力状態を $K_0=0.5$ と仮定し、初期の有効応力状態を鉛直有効応力 80kPa、水平有効応力 40kPa を採用した。

図-9 に Case E と F の単調载荷単純せん断試験結果を示す。等方、異方の初期有効応力状態に拘わらず、いずれもほぼ同じせん断応力~せん断ひずみ曲線となっており、最終的な有効応力状態もほぼ同一となっている。破壊応力比は 0.96 であり、再構成有楽町粘土と比較して大きな値であった。図-10 は図-9 の結果を偏差応力で表したものである。初期異方圧密応力状態を反映して、Case F ではせん断初期から比較的大きな偏差応力が作用していることがわかる。また、 $K_0=0.5$ の Case F の応力状態であっても、せん断応力の負荷により偏差応力はさらなる増加を示している。

図-11 および図-12 に、それぞれ Case E および F の繰り返しせん断試験結果を示す。せん断応力~せん断ひずみ関係を見ると、全試験においてせん断ひずみの発生に偏りが見られる。これは、不攪乱赤井粘土の試験においては、全体的に有効応力レベルが小さいことにより、試験機特性の誤差が顕著に現れた結果と考えており、今後改良の必要がある。通常の有効応力経路を見ると、再構成粘土と同様に、上下対称の試験結果となっている。不攪乱赤井粘土の顕著な特徴としては、いずれの有効応力経路においても、繰り返し時の载荷・除荷の経路が非常に近いことが挙げられる。再構成有楽町粘土では、せん断応力が反転する除荷時には、弾性除荷挙動によって若干のループが見られるものの、不攪乱赤井粘土にはほとんどループは見られない。これは、繰り返しに伴いせん断ひずみの進行は見られるものの、この状態では不攪乱粘土の骨格構造がまだ

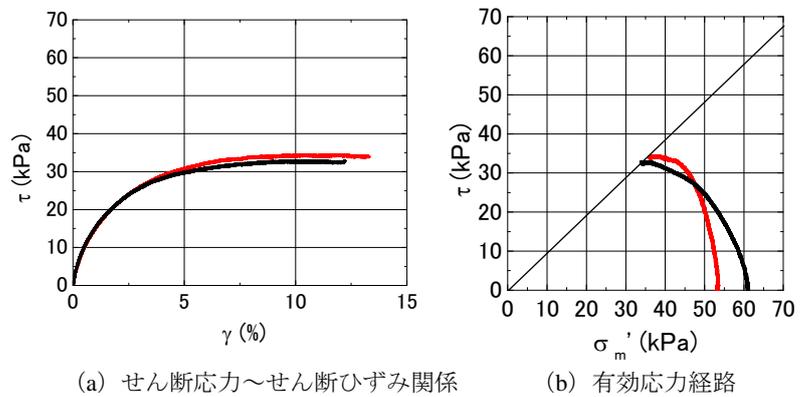


図-9 単調载荷単純せん断試験結果(不攪乱赤井粘土)

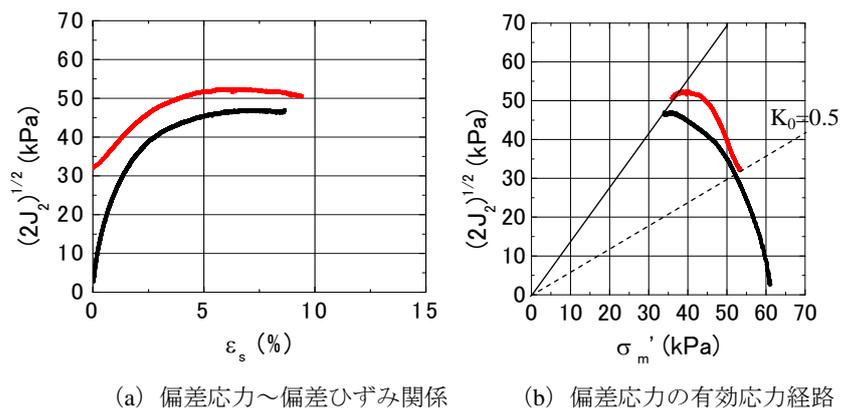


図-10 単調载荷単純せん断試験結果 (不攪乱赤井粘土)

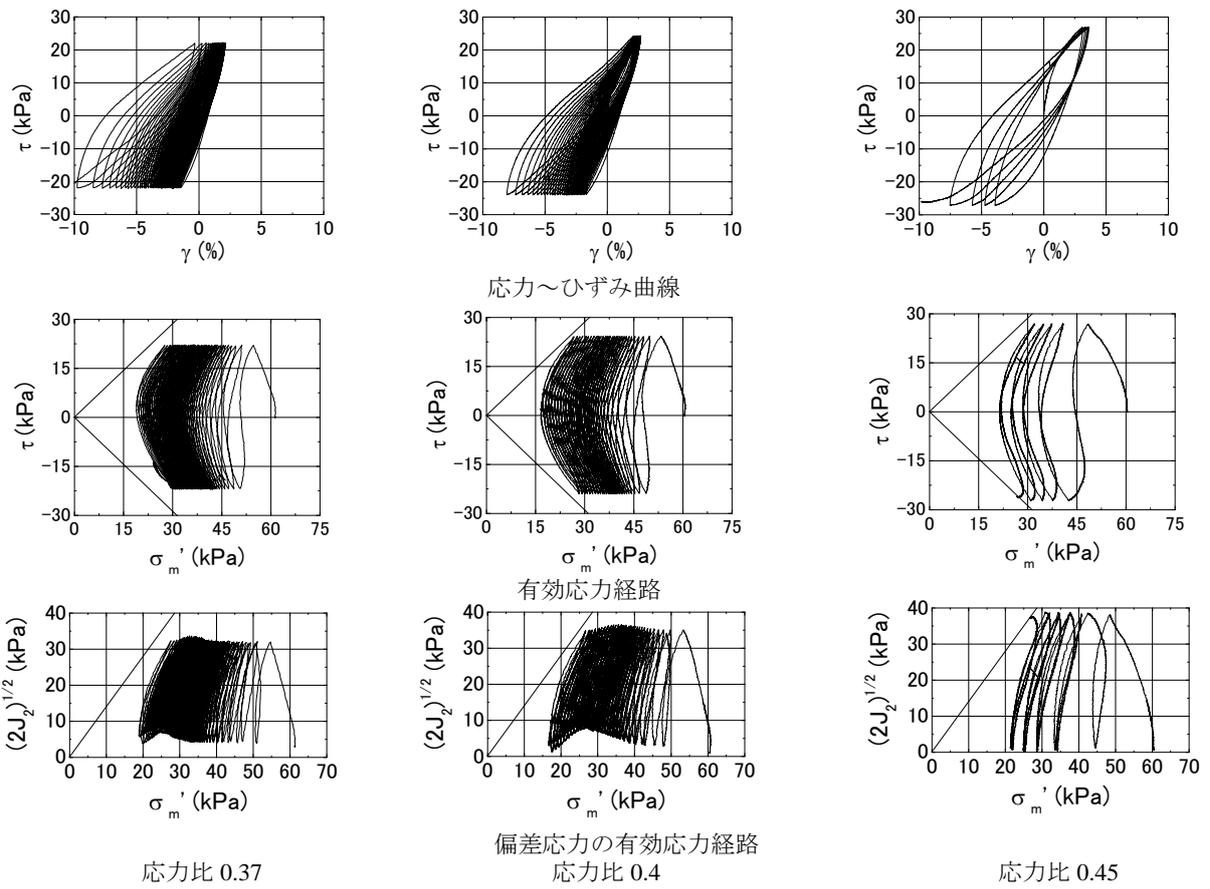


図-11 Case E の繰返し載荷試験結果

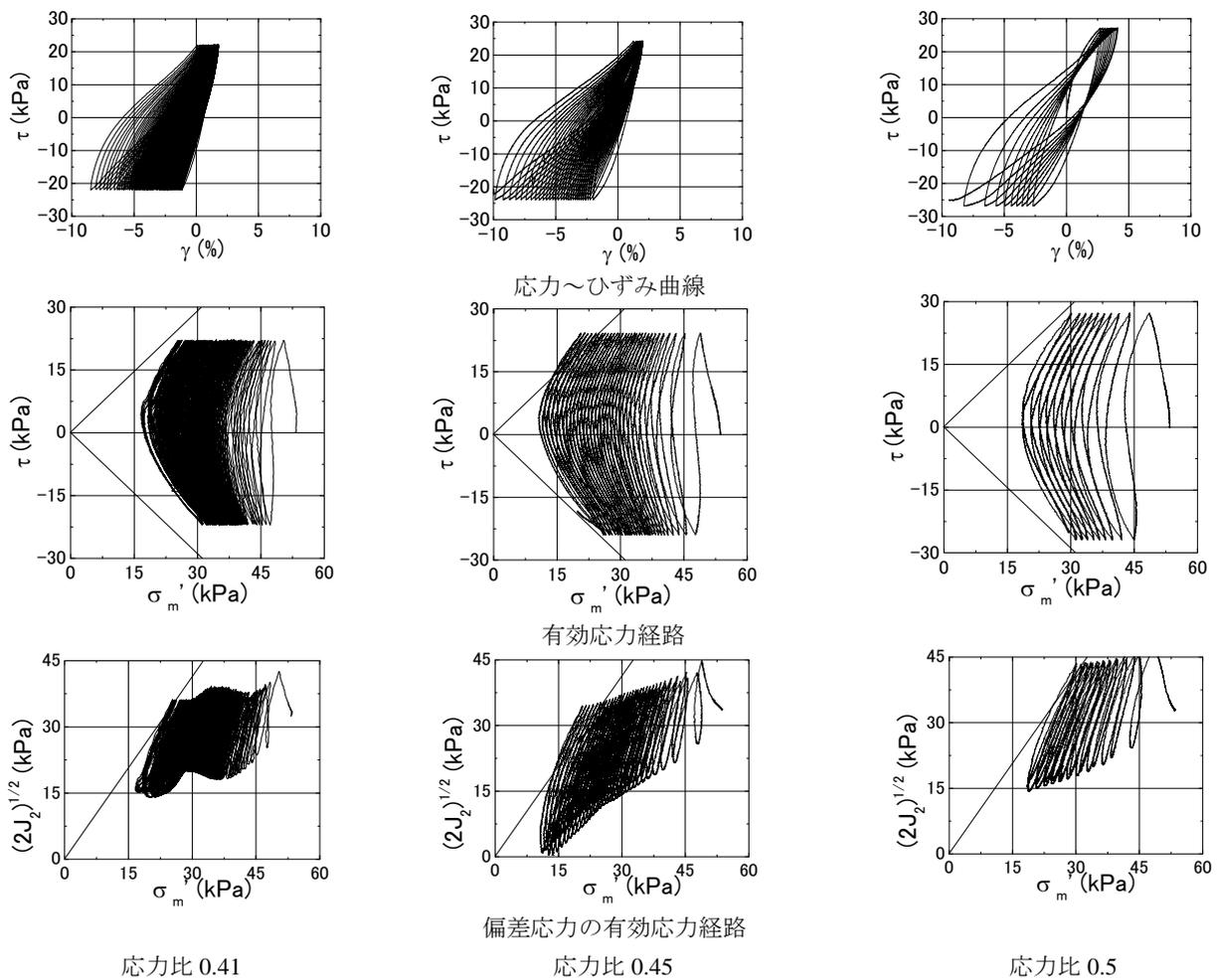


図-12 Case F の繰返し載荷試験結果

維持されている可能性が考えられる。図-12の Case F の偏差応力の有効応力経路を見ると、载荷初期から比較的大きな偏差応力が作用しているが、繰り返し载荷によってさらに大きな偏差応力が作用していることがわかり、この点でも再構成有楽町粘土との違いは大きい。

4.3 繰り返し強度曲線

図-13に試験 Case 毎の繰り返し強度曲線を示す。縦軸には繰り返し载荷時の最大せん断応力 τ と初期平均有効応力 σ'_m の比で定義した繰り返し応力比 τ/σ'_m を用いており、横軸には両振幅せん断ひずみが10%を超えた時点の繰り返し回数である。全般的に、不攪乱赤井粘土の方が、再構成有楽町粘土と比べて繰り返し強度が大きいことがわかる。これは、不攪乱粘土の構造に起因する疑似過圧密特性によるものと考えられる。また、再構成有楽町粘土と不攪乱赤井粘土を個々に見てみると、いずれにおいても K_0 値が減少、すなわち初期有効応力の異方性の度合いが多くなるほど、繰り返し強度が増加することがわかる。 K_0 値が等しい Case C と D では初期有効応力は大きく異なるが、繰り返し強度曲線は一致している。この繰り返し強度曲線は、砂における液状化強度曲線に対応するものであるが、砂では今回の実験のように K_0 値による液状化強度曲線に大きな違いは生じないことが知られており、この試験結果は粘性土特有なものであると考えられる。

以上は、繰り返し応力比の算定に、平均有効応力を用いた結果であったが、次に繰り返し応力比として、再構成有楽町粘土では最大せん断応力 τ を初期鉛直有効応力 σ'_1 で除したものの、不攪乱赤井粘土では、 τ を圧密試験から得た先行圧密応力 $\sigma'_{vc}=80\text{kPa}$ で除したものをを用いる。図-14に新たな定義の繰り返し応力比を用いた繰り返し強度曲線を示す。 K_0 値すなわち異方圧密の履歴によらず、繰り返し強度曲線が再構成、不攪乱それぞれにおいて一致している。この結果は、粘土地盤の繰り返しせん断強度は、それぞれの地盤が置かれている鉛直有効応力に依存して決まる可能性を示唆しており、異方的な有効応力状態にある自然堆積粘土地盤の繰り返しせん断強度を評価する上で有用な知見であると考えている。

5. まとめ

異方圧密応力状態に置かれている自然堆積粘土地盤の繰り返しせん断挙動を評価するために、単純せん断試験装置を開発するとともに、それを用いて異方圧密粘土供試体による繰り返しせん断試験を実施した。偏差応力で整理することにより、異方圧密応力状態からの繰り返し単純せん断挙動は、等方応力状態から実施する繰り返しせん断挙動とは破壊に至る経路などが異なることが明らかとなった。また、繰り返し強度曲線は、繰り返し応力比を過去に受けた最大の鉛直有効応力で整理することによって、統一的に表すことができることが示された。このことから、粘性土の繰り返しせん断特性に関しては、鉛直有効応力が一つの重要なパラメータであることが示唆された。

参考文献：1)田邊，中西，石原，木村(2006)：古奥東京湾地域における沖積層の分布と1923年の関東地震による木造家屋被害の対比，日本地質学会第113年学術大会概要. 2)岩崎，諏訪，山本(1991)：地盤データベースによる東大阪の歴史地震被害と鋭敏粘土の解析，土木学会第46回年次学術講演会，第Ⅲ集，pp.18-19, 1991. 3)KG-NET 関西圏地盤研究会：新関西地盤 大阪平野から大阪湾，2007.

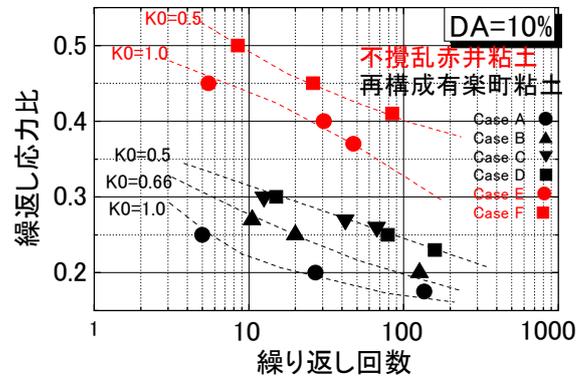


図-13 繰り返し強度曲線 ($\tau/\sigma'_m \sim N$ 関係)

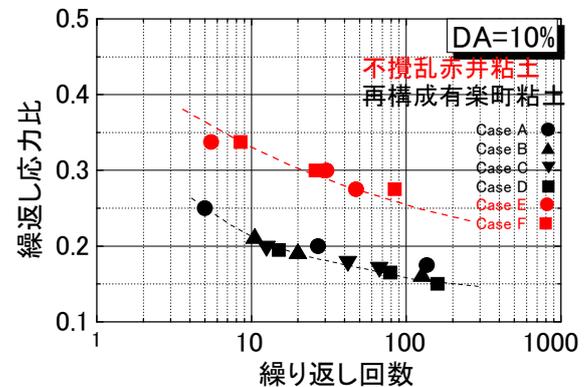


図-14 繰り返し強度曲線 ($\tau/\sigma'_1 \sim N$ 関係)