

第5章

微小変形特性と液状化強度特性

5.1 概説

地盤の液状化強度特性を求める最も一般的な室内土質試験は、不攪乱試料による非排水繰り返し三軸（中空ねじり）試験（以下、液状化試験）である。この試験結果に影響を及ぼす要因としては、試料の密度や粒度分布のほか、土粒子の構造（異方性）、破碎性、および堆積年代（年代効果）等が考えられる。また、これらの直接的要因に顕著な影響を及ぼすものとしては、不攪乱試料採取法の違いがあり、更に凍結サンプリングの場合は、地盤の凍結・融解履歴の影響も作用する。従来、多くの研究者によって液状化強度特性に及ぼす上記の要因が検討されてきた。しかし、実際は上記の要因は複雑に干渉しあっており、実際の土の挙動に対し個々の要因を特定することは困難である。

前章では、沖積層と洪積層より採取された凍結試料と再構成試料の微小変形特性に及ぼす諸要因を検討した。その結果、微小変形特性は、試料の堆積年代の違いにより凍結試料と再構成試料とで異なる傾向を示すことを明らかにし、かつ試料が受けた応力履歴や凍結融解履歴と密接な関係を持つことを示した。

ここでは、凍結試料や様々な履歴を有する再構成試料の液状化強度特性を示すと共に、液状化三軸試験前の微小変形特性との関係について検討した。また、三軸液状化試験中における有効応力の低下と微小変形特性の変化との関係を各試料について示し、液状化強度特性と土粒子構造の安定性、セメンテーション効果等について考察した。

5.2 既往の研究

本章に関連する既往の研究を以下にまとめる。

5.2.1 従来設計における液状化判定に関する研究

ここでは、兵庫県南部地震後に改訂された道路橋示方書・V耐震設計編（（社）日本道路協会、1996）の液状化判定法を取り上げる。

1995年兵庫県南部地震では、従来の想定地震力を超えた強い地震動が発生し、構造物に多大な被害を与えた。また、従来液状化の検討から外されていたような地盤（人口埋め立て地盤における大粒径の礫を含むまさ土）において液状化や側方流動が発生した。これらの事実は、耐震設計をその内容に含む多くの土木・建築関係の基準の見直しに影響を与え、道路橋示方書においても旧液状化判定法（1990年）を見直した改訂版が1996年12月に刊行された。ちなみに、現在2002年改訂版が刊行されているが、液状化判定についての変更はなされていない。

1996年の液状化判定における重要な変更点の一つとしては、液状化する可能性のある土の定義の見直しであった。これは、兵庫県南部地震において礫質土の液状化が確認されたことに起因する。また、近年の地震で液状化したという報告が見られなかった洪積砂質土層についても、 N 値によっては液状化の可能性のある土として考慮されることになった。ちなみに、日本では森&沼田（1998）による遺跡発掘現場における噴砂の痕跡が、洪積層で液状化が発生したという唯一の報告である。一方、海外では比較的新しい洪積層において液状化が発生したという報告（Munson et al, 1997）がある。

液状化強度（繰返し三軸強度比）の設定については、松尾&東（1997）による図5.2.1のような関係と粒度分布に関する補正により、換算 N 値との関係から推定する方法を用いている。なお、図5.2.1には地盤の年代効果の影響も考慮して、埋立土・沖積層および洪積層それぞれに対し液状化強度と換算 N 値との関係が求められているが、道路橋示方書ではこのうち沖積層の結果のみを用いている。

また、松尾（2004）は、1996年に見直された道路橋示方書による液状化強度の推定について、原位置液状化強度 R と繰返し三軸強度比 R_L の間に存在する関係を、岩崎ら（1978）による式[5.1]を用いて整理している。

$$R = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5 \cdot R_L \quad [5.1]$$

ここで、 c_1 は原位置と室内試験の応力状態に関する補正係数、 c_2 は地震動の不規則性に関する補正係数、 c_3 はサンプリングの乱れに関する補正係数、 c_4 は試料の密度化による補正係数、 c_5 は地震動の多方向性や飽和度などの補正係数である。

松尾（2004）によると、道路橋示方書では c_1 は $(1+2K_0)/3$ で近似できるとし、 c_2 は東ら（1996）

による地震動タイプ（プレート境界型・内陸直下型）の違いによる影響を考慮した補正係数を用いているとしている。また、 c_3 , c_4 の試料の乱れに関する補正係数については、図 5.2.1 に示した実験結果が凍結試料によるものであることから、1.0 としている。また、その他の補正係数 c_5 も簡単のため 1.0 としていると報告している。なお、参考までに、道路橋示方書による液状化強度推定値の根拠となっている図 5.2.1 の凍結試料は、すべて 30 kPa の拘束圧で融解されたものであることを記しておく。

松尾 (2004) は、道路橋示方書による液状化判定法は、過去の地震における液状化・非液状化事例を概ね適切に判別することができるとしているが、多様な地盤材料において、液状化強度の大きさとその後のひずみの伸び易さ（液状化後の残留変形）には必ずしも一意的な関係は成立しないと述べている。

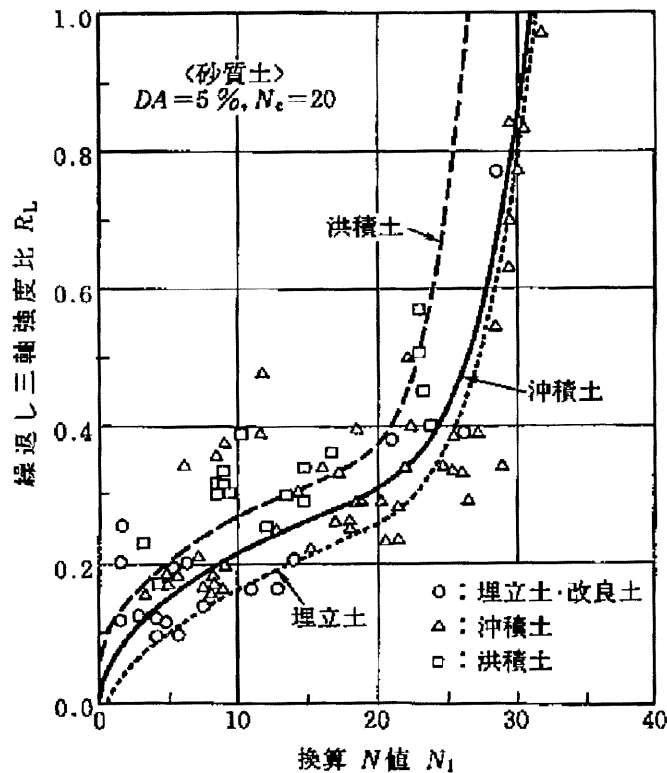


図 5.2.1 換算 N 値と繰返し三軸強度比の関係（松尾&東, 1997）

5.2.2 不攪乱試料採取方法と静的強度および液状化強度に関する研究

不攪乱試料の採取方法は、対象地盤に応じて適切に選択する必要がある。現在、実務において用いられている不攪乱試料採取方法を表 5.2.1 に示す。このうち、本研究でも使用している④凍結サンプリングによる試料は、採取地盤に挿入した凍結管内に液体窒素を循環させて地盤を凍結させ、コアチューブにより採取されたものである。非常に多大なコストが設備にかかることから、重要構造物基礎の検討や研究目的に用いられることが多く、あまり一般的ではない。

一方、チューブサンプリングと呼ばれる①～③の手法は実務において頻繁に用いられており、特に砂地盤に対しては③ロータリー式三重管サンプラーの使用が一般的である。ロータリー式三重管サンプラーのコアチューブは三重管構造を有するものであり、一番外側のコアパレルが地盤を掘削し、真中のコアチューブが地盤を静的に押し込み、内側のチューブ内に試料が納められるものであり、原理的には乱れの少ない試料が採取される。

Tokimatsu & Hosaka (1986)による新潟砂の凍結採取試料とチューブサンプリング試料による静的三軸試験結果を図 5.2.2 に示す。静的試験では、三軸圧縮、三軸伸張試験ともに、ピーク強度に関しては両試料との間に大きな差は認められない。しかし、特に三軸伸張試験におけるダイレイタンス挙動について、チューブサンプリング試料の方が凍結試料よりも大きな圧縮性を示す。また、Yoshimi et al. (1984)は新潟砂の凍結試料とチューブサンプリング試料による液状化試験を実施したが、図 5.2.3 に示すように、チューブサンプリング試料は凍結試料より 30%程度液状化強度は低下することを示した。従来、チューブサンプリング試料では、応力開放の影響、およびボーリングロッドを伝播する振動やコアチューブ回転の偏心により採取試料が乱され、大きな密度変化は生じなくとも自然地盤が本来有する土粒子の構造やセメンテーションの効果が喪失されることは多く指摘されている。したがって、Tokimatsu & Hosaka (1986)は、細粒分の少ない砂の静的強度は、試料の密度の影響が支配的であるため凍結試料とチューブサンプリング試料との間に大きな差は生じないが、チューブサンプリングによる土粒子の構造的な乱れは、負のダイレイタンス挙動に影響を及ぼし、結果として液状化強度の低下につながることを指摘している。

また、原位置にて実施された標準貫入試験による N 値は、当該層の液状化強度を推定する上で頻繁に用いられている。松尾 & 村田 (1997)は、実測 N 値から土被り圧の影響を排した換算 N 値と、異なる手法によって採取された不攪乱試料の液状化強度を比較している。その結果を図 5.2.4 に示すが、凍結試料による液状化強度は、換算 N 値の増加と共に増加する一方、チューブサンプリングでは換算 N 値の変化によらず、ほぼ一定の液状化強度を呈している。これは、チューブサンプリング試料は凍結試料と比較して、土粒子構造や年代効果に対し、明らかに乱れが生じていることを示している。

なお、⑤ブロックサンプリングについては、基本的に手掘り作業によって直接切り出すことのできる地盤を対象としているため、地下水位以深の液状化対象層のサンプリングには通常適

用されない。

表 5.2.1 不攪乱試料採取法と対象地盤

サンプリング手法	規格	対象地盤
①シンウォールサンプラーによる採取	JGS-1221	やわらかい粘性土
②ロータリー式二重管サンプラーによる採取	JGS-1222	硬質な粘性土
③ロータリー式三重管サンプラーによる採取	JGS-1223	砂質土または硬質粘性土
④凍結サンプリングによる採取	-	砂質土
⑤ブロックサンプリングによる採取	JGS-1231	すべての地盤（地下水位以浅）

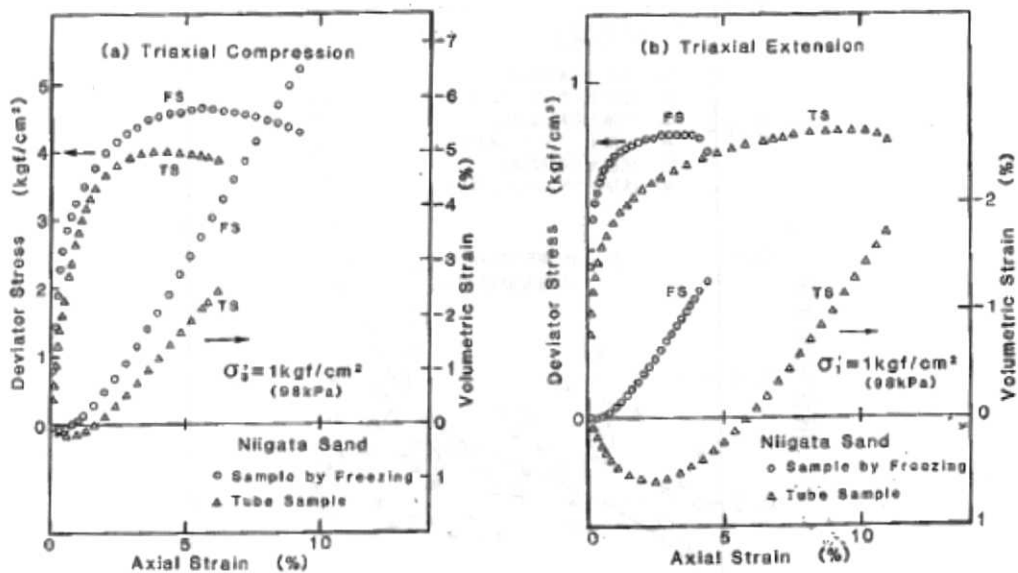


図 5.2.2 凍結試料とチューブサンプリング試料による a) 三軸圧縮 b) 三軸伸張試験結果 (Tokimatsu & Hosaka, 1986)

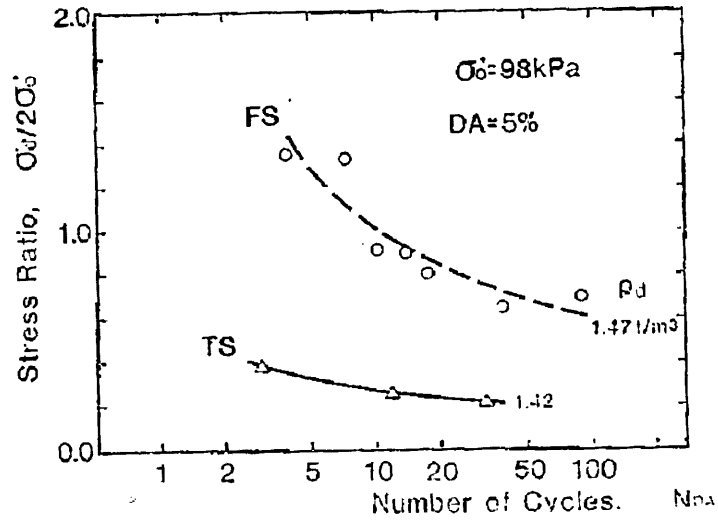


図 5.2.3 凍結試料とチューブサンプリング試料による液状化試験結果 (Yoshimi et al., 1984)

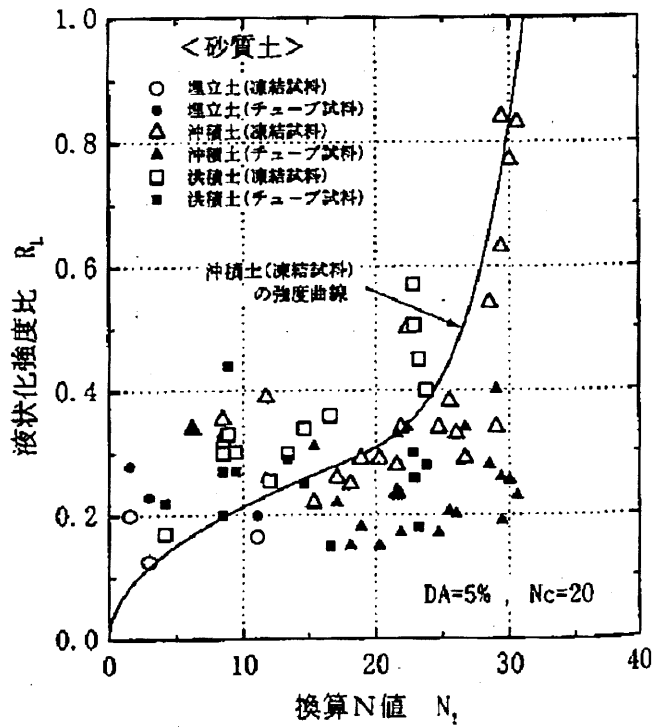


図 5.2.4 液状化強度比と換算 N 値の関係 (松尾 & 村田, 1997)

5.2.3 地盤の凍結融解履歴と静的強度および液状化強度に関する研究

地盤凍結時の体積膨張が、凍結採取試料の乱れに影響を与えることは良く知られている。すなわち、地盤を構成する土粒子は温度変化に対してその構造に変化は生じないと仮定しても、間隙水の体積膨張は凍結により約10%増加するため、地盤本来の土粒子構造の安定性や年代効果の影響が喪失される可能性がある。また、この凍結膨張量は間隙水が排水されにくいシルトや粘土の含有率の影響を受ける。

Yoshimi, et al. (1978) は、豊浦砂と利根川砂の再構成試料を用い、凍結融解履歴を受けた試料と受けていない試料の三軸圧縮試験を実施しているが、図 5.2.5 に示すように、凍結融解履歴の有無は、試料の静的挙動にほとんど影響を与えないことを示している。

また、密度調整した再構成試料と凍結試料の液状化挙動を比較すると、前者の方が極端に低い液状化強度を示す傾向が多数確認されている (Yoshimi et al. (1978, 1984), Hatanaka et al. (1985, 1988), Goto et al. (1987, 1992))。一方、再構成試料に予め初期せん断履歴を与えることで、液状化強度を上昇させることができる (e.g., Seed (1979), Singh et al. (1982))。そこで、Goto (1993) はこのような手順によって比較的高い液状化強度を保持させた再構成試料を作成し、凍結融解履歴を与えて、細粒分含有率の違いによる凍結膨張ひずみが試料の液状化強度に及ぼす影響を検討した。系統的な実験により、細粒分を含まない砂 (豊浦砂) では 20 kPa 以上の拘束圧では凍結融解による乱れは無いことを示した。また図 5.2.6 に示すように、せん断履歴によって与えられた付加的な液状化強度の増加分が凍結融解履歴を経て保持されている程度を示す健全度 (Sample Index, I_{sq}) を導入し、 I_{sq} は凍結時の膨張ひずみに依存することを示した。この概念により、Goto (1993) は凍結時の地盤の膨張量が約 0.5 % 以下であれば、凍結試料の乱れはほとんど無視できることを示した (図 5.2.7)。

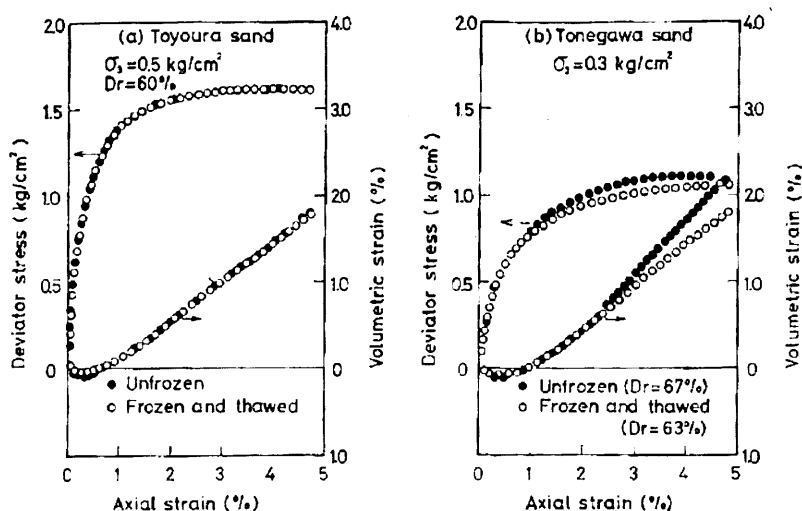


図 5.2.5 a)豊浦砂 b)利根川砂再構成試料による
三軸圧縮試験結果に及ぼす凍結融解履歴の影響 (Yoshimi, et al, 1978)

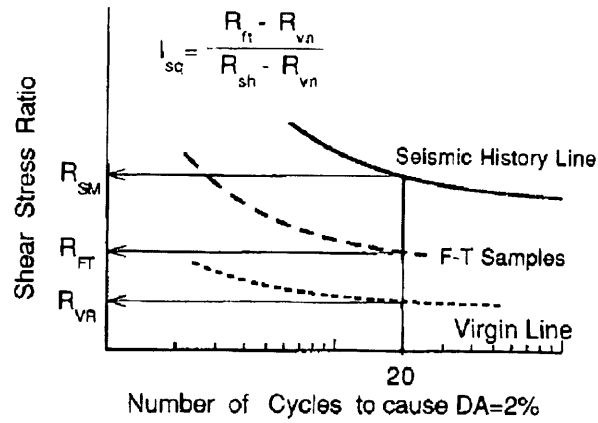


図 5.2.6 凍結融解履歴を受けた試料の健全度 I_{sq} の定義 (Goto, 1993)

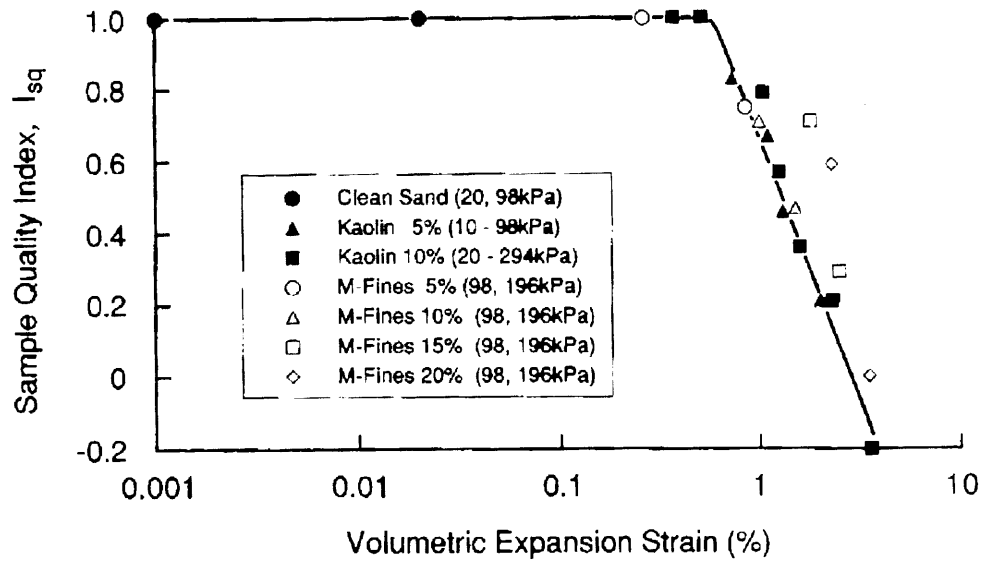


図 5.2.7 試料の凍結膨張ひずみ I_{sq} と健全度の関係 (Goto, 1993)

5.2.4 凍結試料の融解時拘束圧と液状化強度に関する研究

原地盤における応力状態で凍結された試料は、融解時の応力状態によっては応力除荷履歴やせん断履歴によって凍結試料が乱され、地盤が本来有する土粒子構造や年代効果に影響を及ぼす可能性がある。

しかし、凍結サンプリングに伴う地盤の凍結膨張と細粒分含有率に関する報告に対し、凍結試料の融解時の応力条件に着目した研究は比較的少ない。これは、一般的に融解時拘束圧の液状化強度に及ぼす影響が凍結時の膨張による影響と比較して無視できるほど小さいと考えられていることによると思われる。

Yoshimi & Goto (1996)は、再構成試料による凍結融解試験により、融解時の体積収縮量は数値上では凍結時の体積膨張量と同じであることを示した(前章 4.2.1 参照)。その他、Goto (1993)も同じ拘束圧で凍結融解履歴を与えた試料の残留ひずみは非常に小さいと述べている。したがって、凍結試料の融解時拘束圧については、できるだけ原位置に近い応力状態を保つことが重要といえるが、Yoshimi et al. (1984)は、有効土被り圧 $\sigma_v' = 98 \text{ kPa}$ より採取した凍結試料(新潟砂、沖積層)について、融解時拘束圧を三通りに変化させ、それぞれの液状化強度を比較した。その結果、図 5.2.8 に示すように、有効土被り圧の約 20 分の 1 の応力で融解させた試料でも液状化曲線に変化はないことを示している。

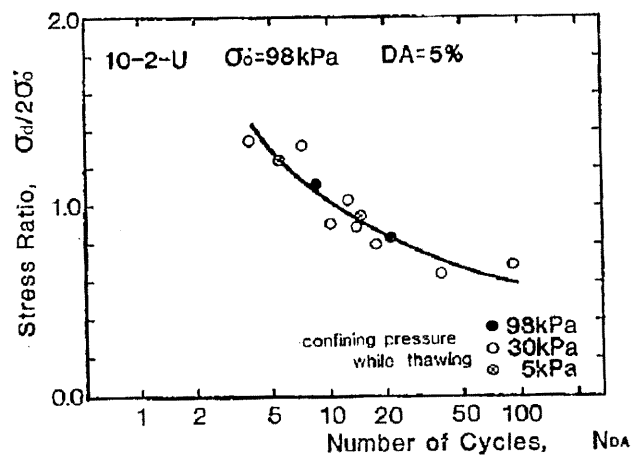


図 5.2.8 融解時拘束圧が液状化強度曲線に及ぼす影響 (Yoshimi et al., 1984)

5.2.5 液状化強度と微小変形特性に関する研究

微小変形特性は 10^{-3} %以下の変形特性を指し、限りなく弾性挙動に近いひずみレベルの挙動であると考えられる。したがって、測定時において試験試料に大きなひずみを与えて乱すことが無い場合、純粋な微小変形特性を得るためだけでなく、試験試料の状態を推定するのにも頻りに扱われる。その代表的な例が、原位置 *PS* 検層結果との比較による不攪乱試料の乱れの影響評価である。また、図 5.2.9 に示すような *S* 波速度 V_s と標準貫入試験結果との相関 (e.g. Imai & Tonouchi, 1982) が一般的に用いられていることから、 G_d は地盤の強度と密接な関係があるとされ、液状化強度との関係も多くの研究によって報告されている。

例えば Tokimatsu & Hosaka (1986) は、図 5.2.10 および図 5.2.11 に示すように、液状化試験前に初期せん断履歴を与える際の振幅を変えたり、除荷履歴を与えたりすることによって液状化強度が変わることを示したが、同時に液状化強度と微小繰り返し载荷による静的せん断剛性率との間に良い相関があることを示している。また、凍結試料とチューブサンプリング試料の液状化強度と静的微小せん断剛性率、および原位置 *PS* 検層結果を比較し、試料採取時の乱れは原位置での動的せん断剛性率と比較することで評価できることを示した。また、凍結試料のせん断剛性率と液状化強度により、乱された試料の値を正規化することで、両者の関係を適切に表現できることを示した (図 5.2.12)。更に、液状化強度は、初期せん断履歴だけでなく、過圧密履歴によっても変化することが知られている (Tatsuoka et al., 1988)。Tokimatsu et al. (1986) は、このような液状化強度の違いを静的微小弾性せん断剛性率で評価できることを示した。同様の報告は、Yoshimi et al. (1989) でも示されている。

Tokimatsu (1988) は、上述のような初期せん断履歴と液状化強度の増加の関係、および液状化強度とせん断剛性の関係に着目し、原位置 *PS* 検層によるせん断剛性率と同等の値となるように、再構成試料や攪乱試料に初期せん断履歴を与え、履歴付与後の試料を凍結試料と同等の液状化強度を有する試料とみなす「ハイブリッド法」と呼ぶ方法を紹介している (図 5.2.13)。

しかし、微小変形特性の観点から大ひずみにかかわる液状化抵抗を推定することは困難だという見解 (吉見 & 福武, 2005) もある。また、原位置の応力状態は通常の三軸試験のような等方状態ではなく、常に異方応力状態にある。したがって、原位置試験と室内試験をリンクさせる場合は、せん断剛性の応力状態依存性についても考察すべきであり、また通常の室内試験のひずみレベルを超える大きな変形を許容する液状化試験と、その微小変形特性の関係を求める必要がある。

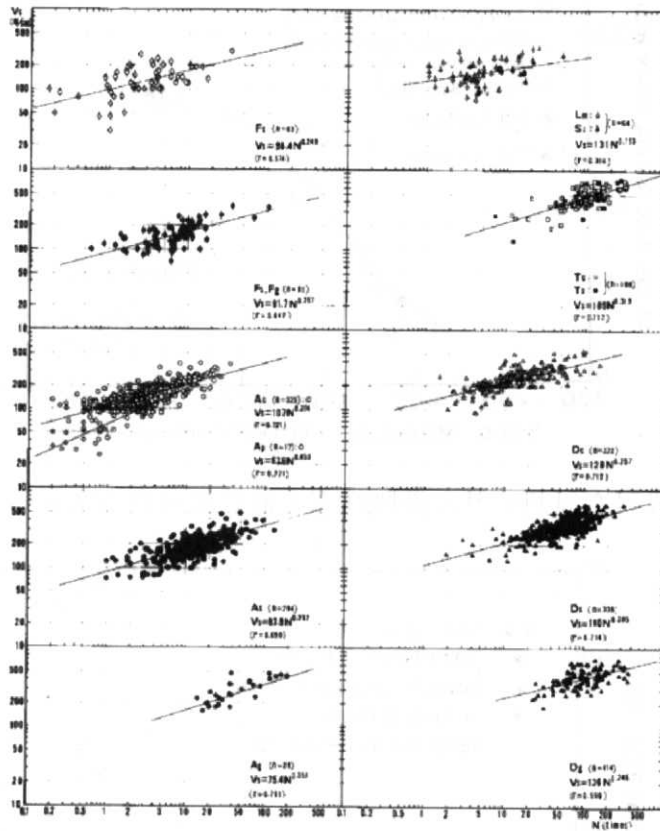


図 5.2.9 S波速度とN値の相関 (Imai & Tonouchi, 1982)

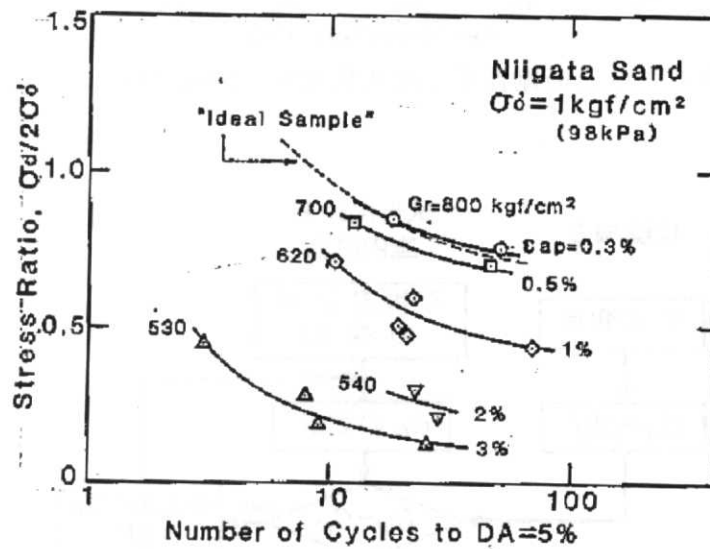


図 5.2.10 初期せん断時のひずみ振幅とせん断剛性率、および液状化強度曲線の関係 (Tokimatsu & Hosaka, 1986)

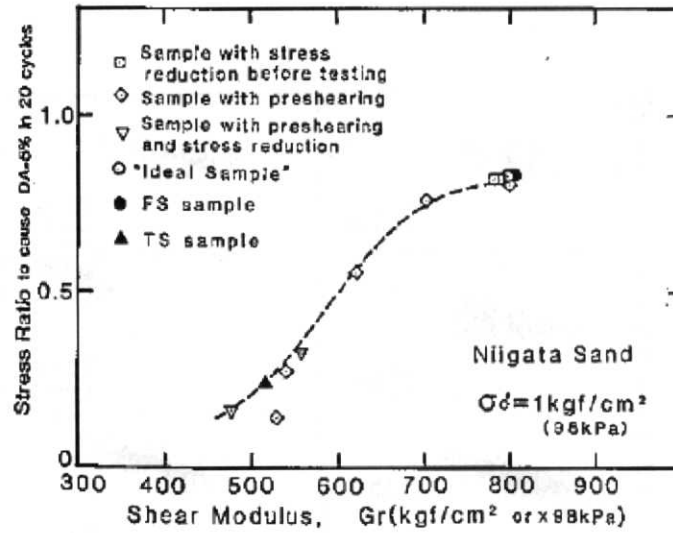


図 5.2.11 応力履歴を受けた試料のせん断剛性率と液状化強度の関係 (Tokimatsu & Hosaka, 1986)

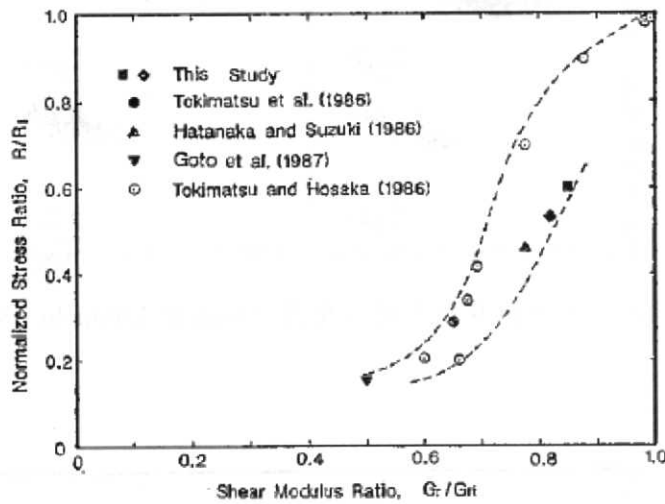


図 5.2.12 正規化されたせん断剛性率と液状化強度の関係 (Tokimatsu & Hosaka, 1986)

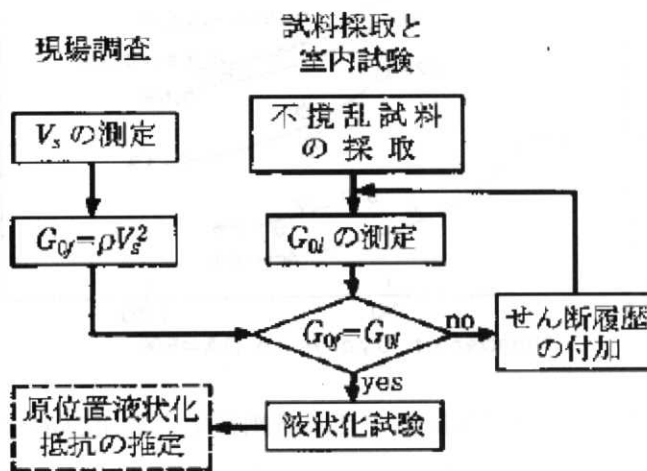


図 5.2.13 Tokimatsu (1988)によるハイブリッド法の手順

5.2.6 液状化中の微小変形特性の変化に関する研究

前節では、主に液状化前の微小変形特性と液状化強度の関係について示したが、液状化試験中に静的・動的微小変形特性を計測した例もいくつか報告されている。

Koseki, et al. (2000)は、密詰めの豊浦砂を用いて三軸および中空ねじり試験を実施し、液状化試験中に微小繰り返し载荷を鉛直・ねじり方向に与えた。図 5.2.14 に、ヤング率およびせん断剛性率と応力との関係（静的ヤング率 $E_s \sim$ 鉛直有効応力 σ'_v 関係、せん断剛性率 $G_s \sim$ 平均有効応力 $\sigma'_m = (\sigma'_v + \sigma'_h)/2$ 関係）を示すが、各微小変形特性の値は等方圧密時のものと比較して低い値であった。この理由として、Koseki, et al. (2000)は液状化による土粒子構造のダメージが影響していると報告している。また三軸試験による静的ヤング率 E_s は三軸伸張状態の方が三軸圧縮状態よりも低い値となっているが、これは圧縮状態よりも伸張状態の方が土粒子構造に与えるダメージが大きいことを意味している。このような例は Koseki et al. (1998, 1999 a)でも報告されているが、その一方、Koseki et al. (1999 b)および Koseki & Ohta (2001)では、液状化中の三軸圧縮状態と三軸伸張状態の E_s はほぼ同程度であった。これは、後者の報告では試験供試体は細粒分を含む試料であったことから、試料の種類や作成手法の違いが影響している可能性があると考えられる。

さらに、Tanizawa et al. (1994)は三軸試験による豊浦砂を用いた液状化試験において、ベンダーエレメントにより液状化中の動的せん断剛性率 G_d を計測しているが、三軸圧縮状態と三軸伸張状態では後者の方が G_d はかなり小さくなることを示した。

Goto et al. (1999)は、同様の実験を豊浦砂と原位置凍結試料にて実施したが、液状化後の S 波速度 V_s は、液状化前と比較して約 20%にまで低下したことを示した。また、液状化中の等方応力状態 ($q=0$) における動的せん断剛性率 G_d について、応力状態が三軸圧縮状態から伸張状態へ移行する場合と、その反対の場合を比較した結果、前者の方が若干高い値が得られる傾向があると示した (図 5.2.15)。更に、三軸伸張状態で計測された G_d は、圧縮状態や等方応力状態と比較して大きく低下することを示した。

なお、上記二つの報告 (Tanizawa et al. (1994), Goto et al. (1999)) における動的せん断剛性率 G_d は、平均有効主応力 p' との相関において記述されたものである。

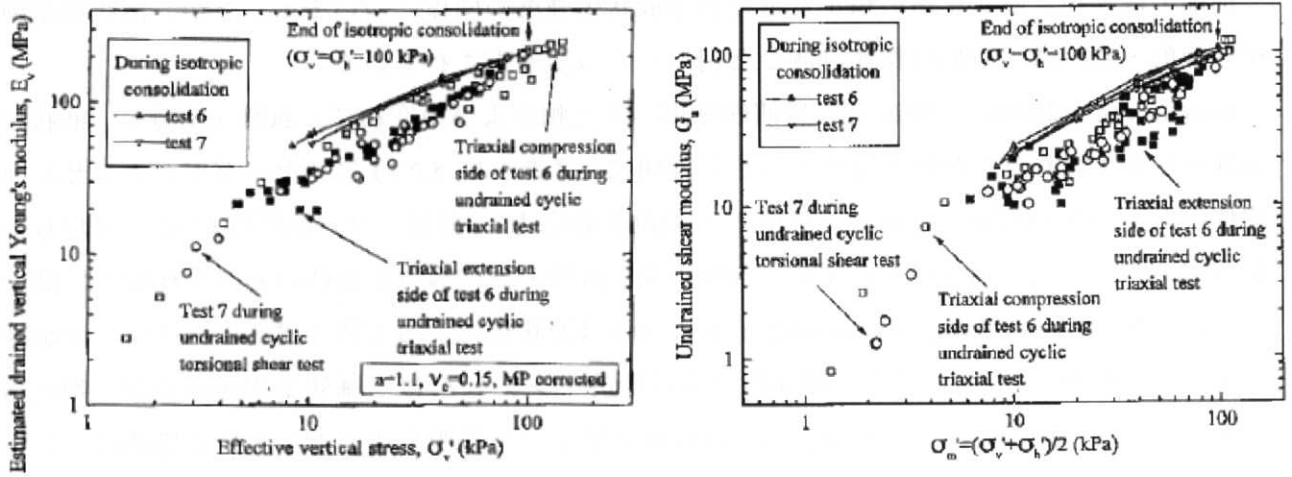


図 5.2.14 液状化試験中の a) ヤング率、b) せん断剛性率の変化 (Koseki, et al., 2000)

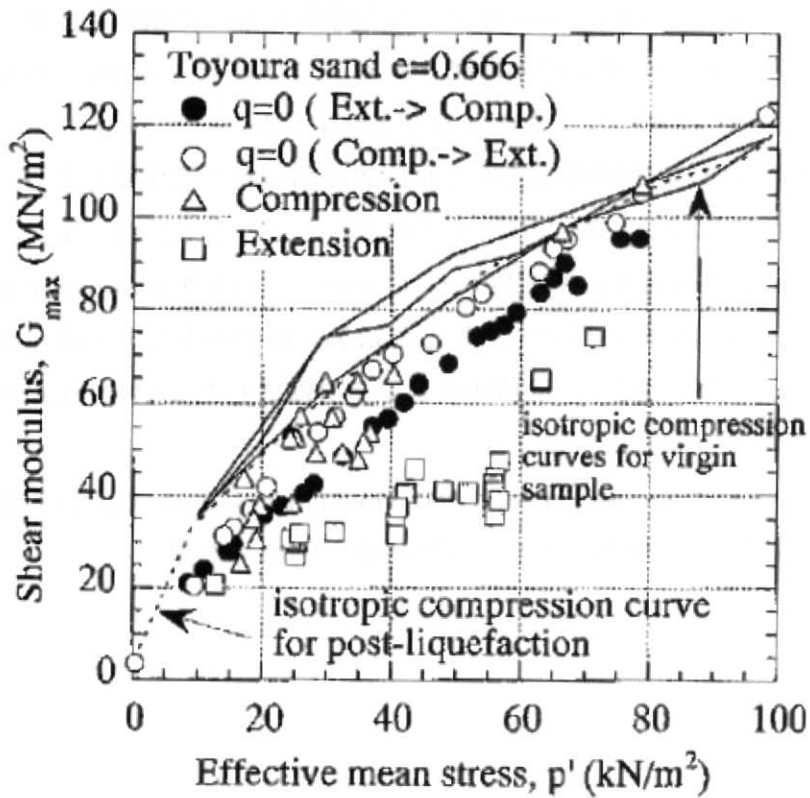


図 5.2.15 液状化試験中のせん断剛性率と平均有効主応力の関係 (Goto et al., 1999)

5.3 凍結試料の液状化特性

5.3.1 凍結試料の有効応力経路と応力-ひずみ曲線

凍結試料の液状化試験結果として、図 5.3.1~図 5.3.6 に、利根川砂、江戸川砂 A, B, C の有効応力経路と応力-軸ひずみ曲線を示す。なお、有効応力経路については偏差応力 q と平均有効主応力 p' を用いて示す。

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma'_v - \sigma'_h \quad [5.2]$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)}{3} = \frac{(\sigma'_v + 2\sigma'_h)}{3} \quad [5.3]$$

また、本研究ではいくつかの試料において液状化試験中の様々な応力状態において微小変形特性を計測している。各試料の有効応力経路、応力-ひずみ曲線には、微小変形特性を計測した位置をプロットしてある。

液状化試験時における有効応力経路は、試料の違いによらず、非排水繰返しせん断に伴う有効応力の低下に伴い *cyclic mobility* が発生し、比較的密な土の液状化挙動を呈する。応力-ひずみ関係では、繰返し回数が増加しヒステリシスループが逆 S 字型になると、偏差応力 q がほぼゼロの応力状態で軸ひずみ ε_v が増大している。しかし、江戸川砂 A 試料では、液状化に伴う有効応力の低下が比較的鈍く、 $p' = 10$ kPa 程度で最低値となっている。これは、江戸川砂 A 試料は細粒分含有率が 60% と非常に高いことから、粘着力により液状化に対する抵抗が大きいためであると考えられる。また、江戸川砂 A 試料を除く大部分の実験において、繰返し载荷に伴い伸張側にシフトしながら軸ひずみ ε_v が変動している。

融解時拘束圧の違いが有効応力経路に及ぼす影響として、全体的に融解時拘束圧の高い試料では非排水せん断開始時において q の増加と共に p' も増加する傾向が認められるのに対し、融解時拘束圧の低い試料ではせん断開始時から p' が減少する傾向にある。この原因としては、供試体の初期異方性の違いによるものと考えられ、融解拘束圧の違いが土粒子の微視的構造に影響を与えている可能性が考えられる。

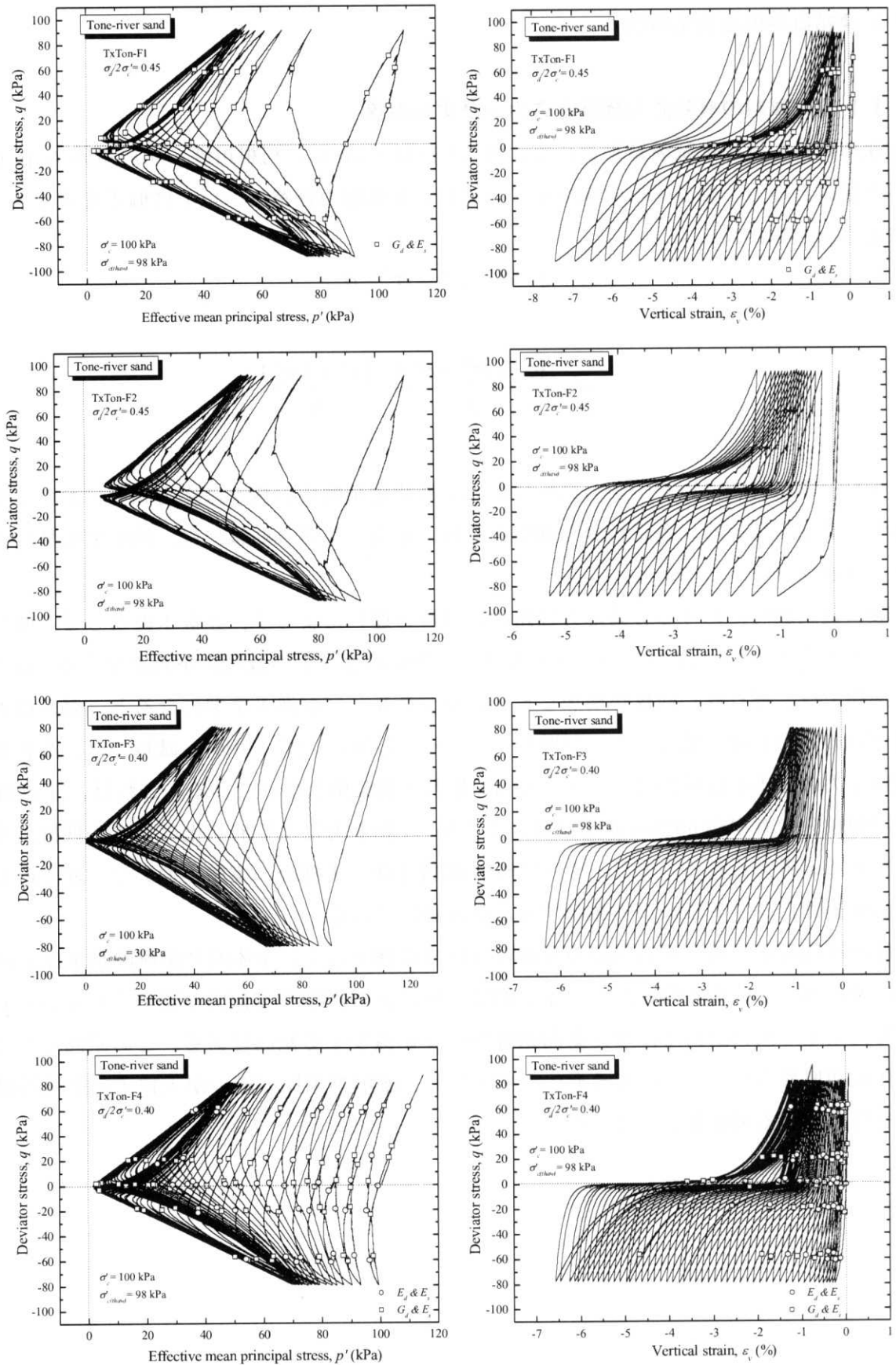


図 5.3.1 利根川砂凍結試料の液状化試験結果その 1 (左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

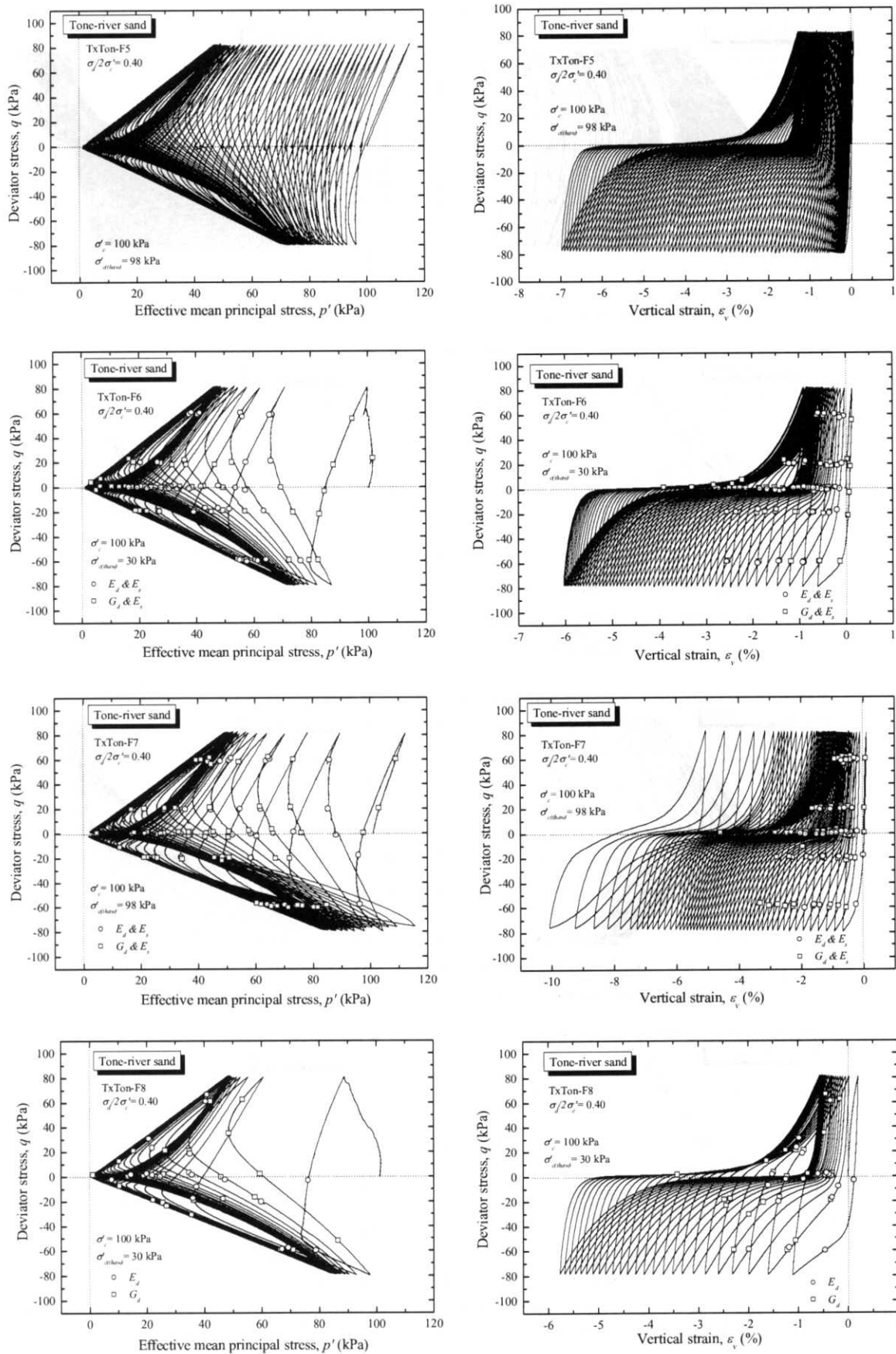


図 5.3.2 利根川砂凍結試料の液状化試験結果その 2 (左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

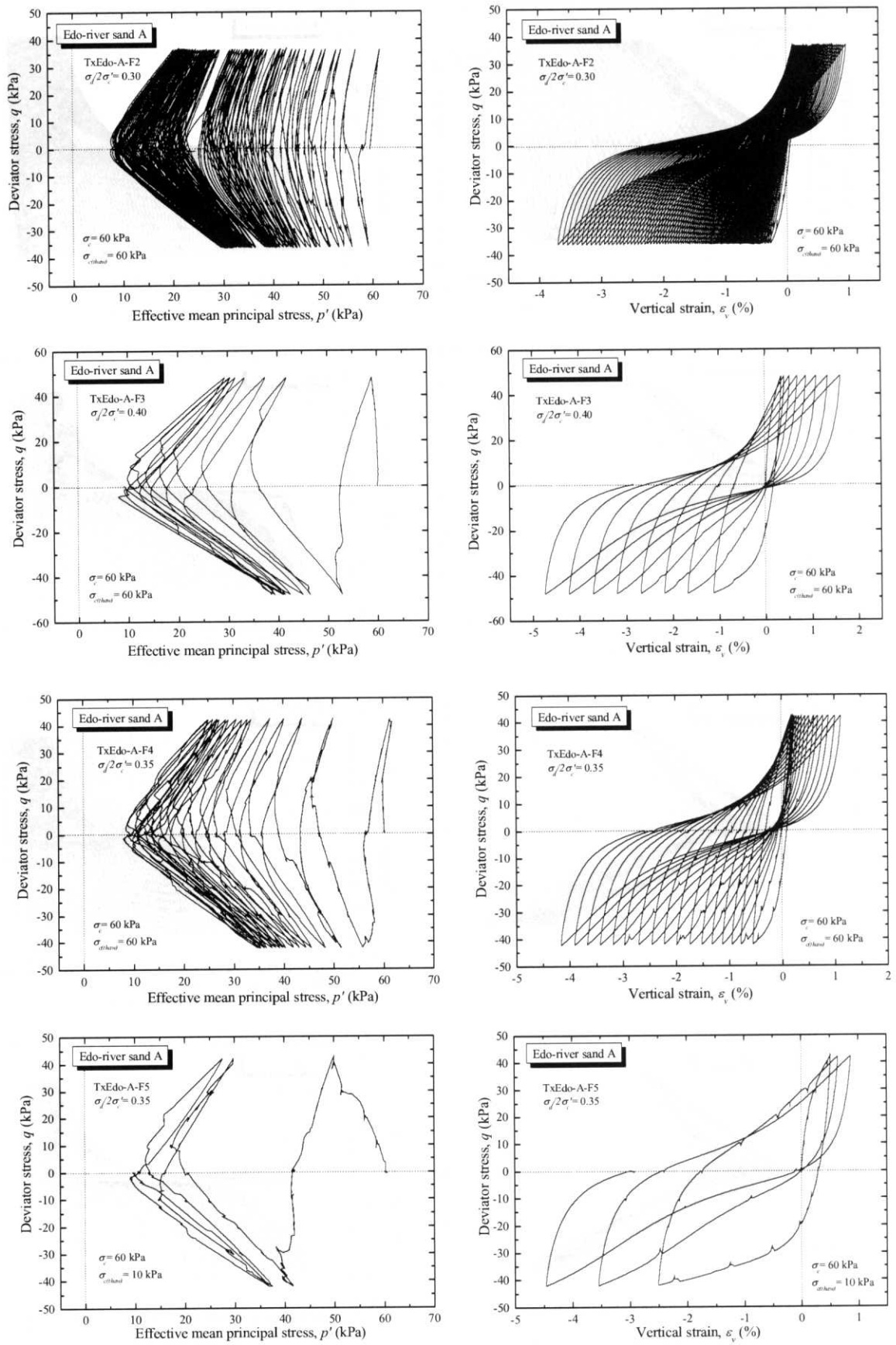


図 5.3.3 江戸川砂 A 凍結試料の液状化試験結果 (左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

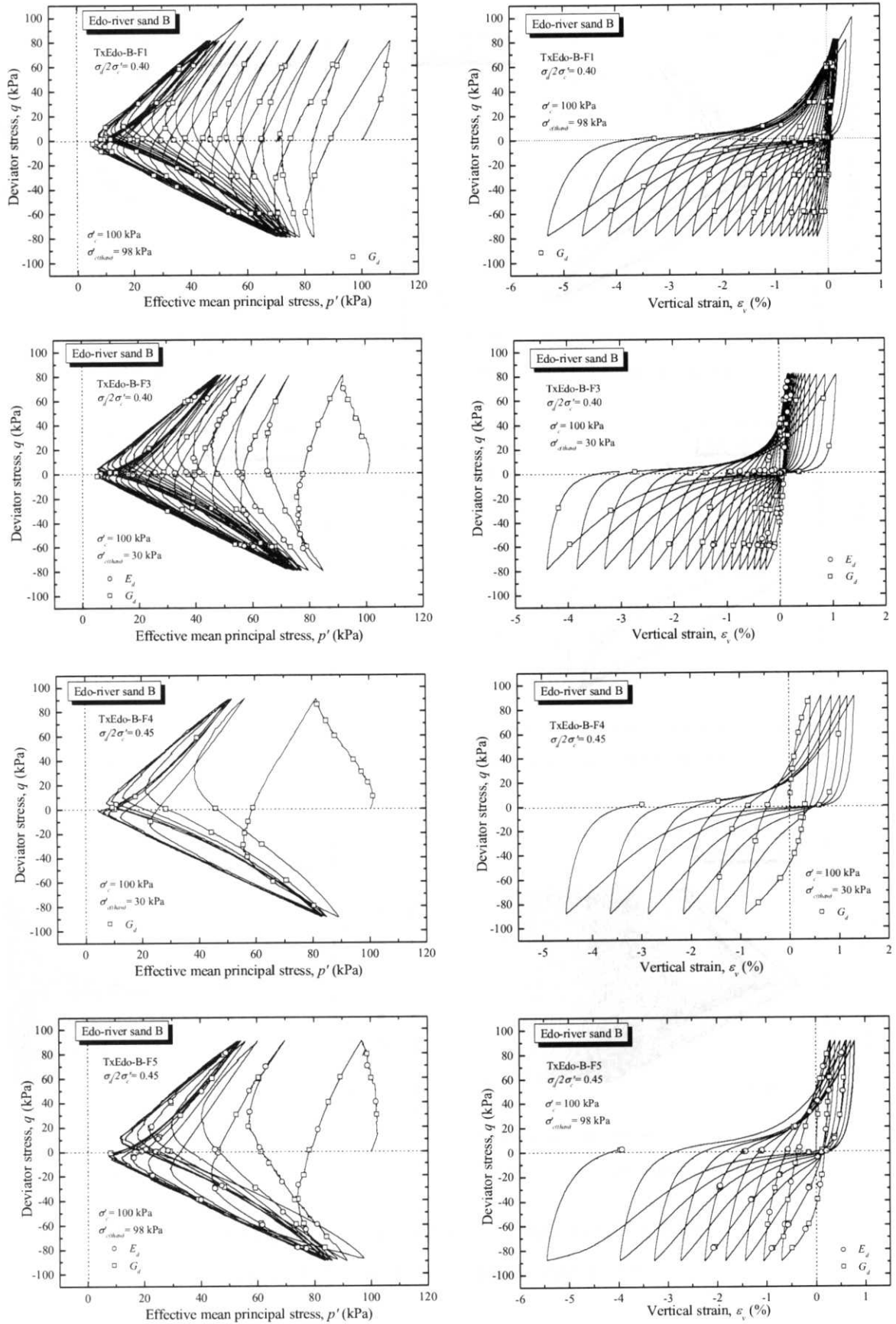


図 5.3.4 江戸川砂 B 凍結試料の液状化試験結果 (左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

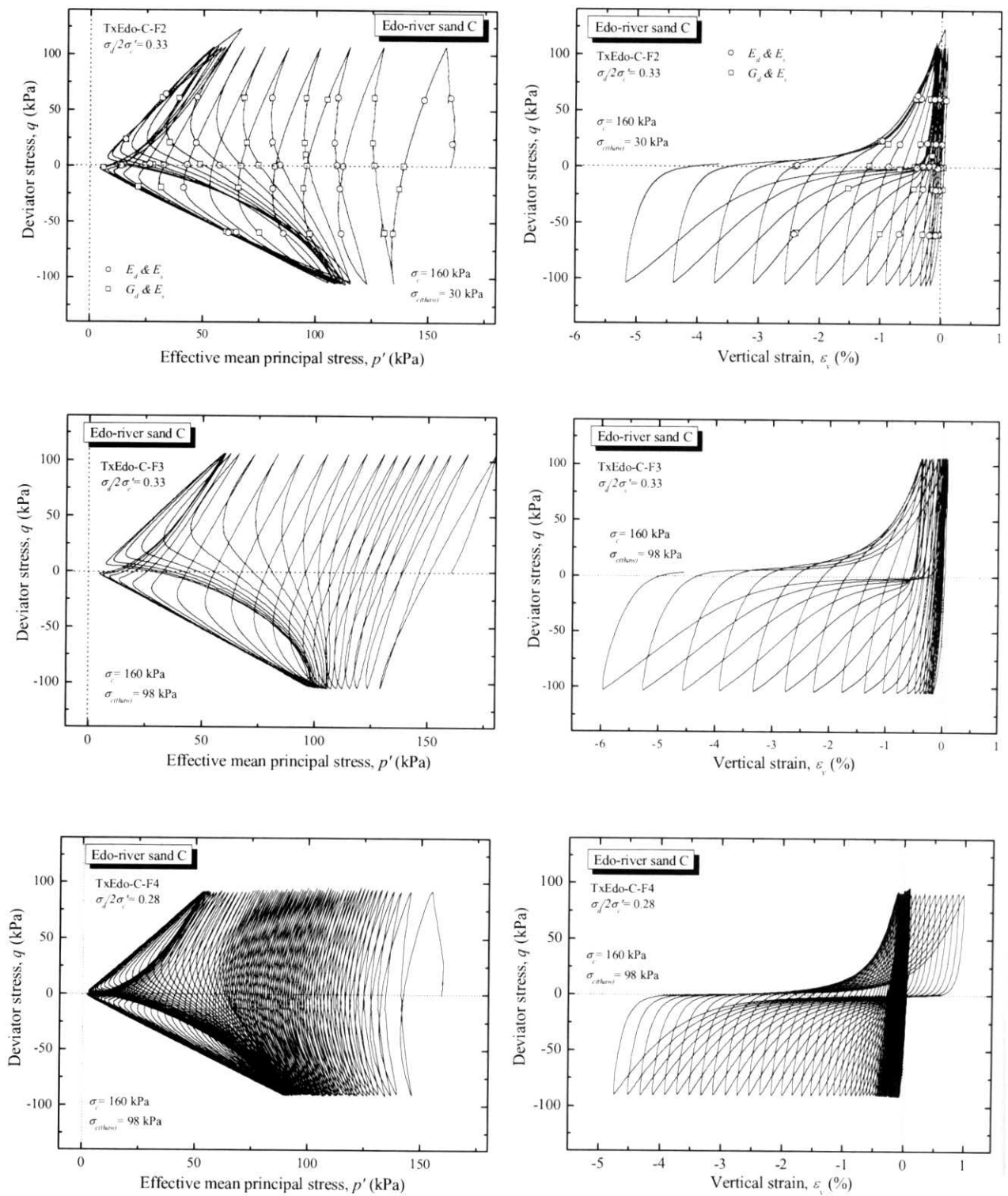


図 5.3.5 江戸川砂 C 凍結試料の液状化試験結果その 1

(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

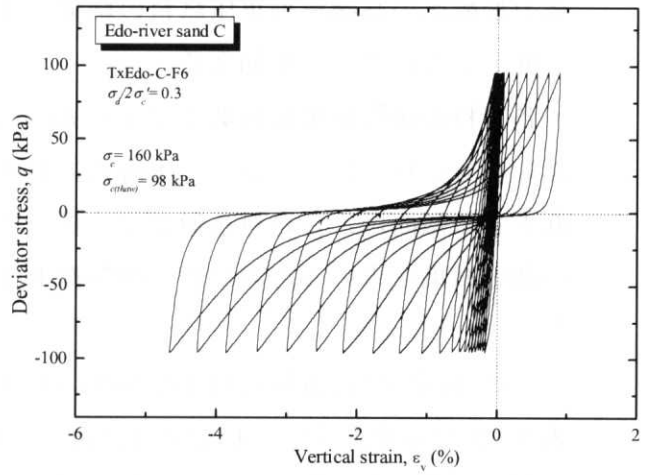
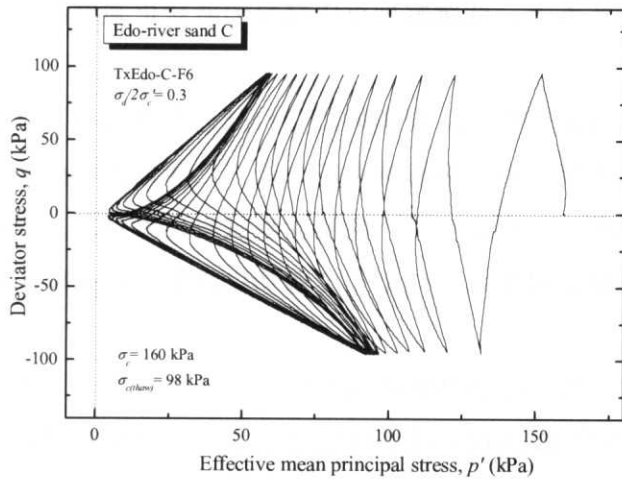
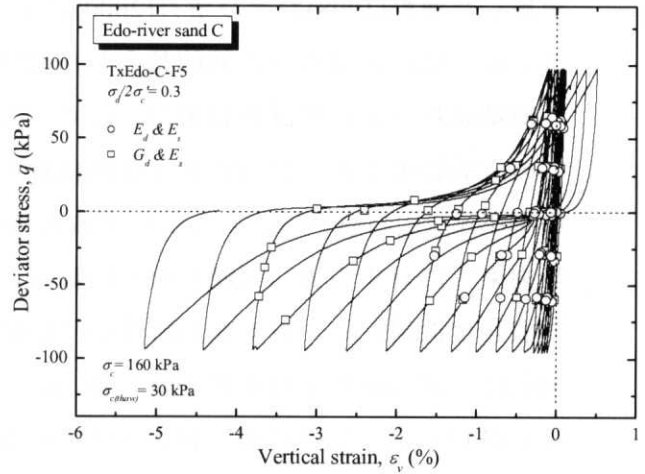
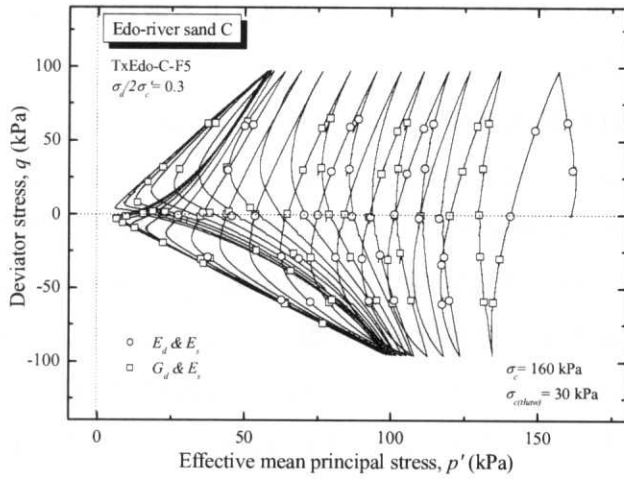


図 5.3.6 江戸川砂 C 凍結試料の液状化試験結果その 2
(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

5.3.2 凍結試料の液状化強度

利根川砂・江戸川砂 A, B, C 凍結試料による液状化試験結果として、所定の軸ひずみ振幅に至るまでの繰り返し回数を表 5.3.1~表 5.3.4 に、液状化強度曲線を図 5.3.7~図 5.3.10 に示す。また、図 5.3.7 の利根川砂試料、および図 5.3.9 の江戸川砂 B 試料については、同一試料で実験を実施した浦野(1998)および望月(2000)による結果も併記しており、本研究による液状化試験結果はこれら既往の報告と比較的整合した関係が得られている。

凍結試料の液状化試験結果は、ばらつきが比較的大きいことなどから、各試料ともに、すべての実験結果が統一的な液状化強度曲線上にあるとは言い難い。しかし、各試料ともに融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いは、少なからず液状化強度に影響を与えているといえる。表 5.3.5 に各融解時拘束圧に対する R_{L15} (繰り返し回数 $N_c=15$ の時の所定の軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)}=3\%$ で定義した液状化抵抗) と、微小変形特性の平均値を示すが、融解拘束圧の低い凍結試料の R_{L15} は融解拘束圧の高い試料よりも若干低い値 (6~14%程度) を示し、その低下率は洪積層 (江戸川砂 B, C 試料) よりも沖積層 (利根川砂) の方が大きい。また、江戸川砂 A 試料については、低融解拘束圧試料の試験が一供試体のみであるため、液状化曲線を求めることはできないが、同じ応力振幅比の高融解拘束圧試料の結果と比較すると、低融解拘束圧試料の液状化強度は明らかに低下していることが伺える。

各試料の融解拘束圧の低下による R_{L15} の低下の程度は、現実的にそれほど大きな値とはいえないかもしれない。しかし、本研究における実験より、融解拘束圧の低下に伴い液状化強度も低下する傾向は、各試料を通じて一貫している。したがって、凍結採取試料により、より精度の高い結果を求めるためには、融解拘束圧の値を対象試料に応じて適切に設定する必要がある。

また、前章では、融解時拘束圧が低い場合には微小変形特性の値も低くなることを示したが、表 5.3.5 に示すように、利根川砂試料と江戸川砂 B 試料では液状化強度 R_{L15} と液状化試験前に計測した微小変形特性との間に相関関係があることがわかった。特に、動的せん断剛性率については、すべての試料において R_{L15} との相関が認められる。なお、ここでは液状化試験の直前に計測した微小変形特性を、初期微小変形特性と称し、 E_{s0} , E_{d0} , G_{d0} のように記す。

このように、本研究では、従来凍結試料の融解時拘束圧の影響はないとされた Yoshimi et al. (1984) による報告とは異なる結果が得られた。Yoshimi et al. (1984) は GL-9~-10 m 付近に分布する、 N 値約 30 程度の細粒分をほとんど含まない新潟砂試料 ($D_{50}=0.29$ mm, $F_c=0\%$) について、5 kPa~98 kPa の拘束圧で融解した試料を用いて比較を行っている。したがって、本研究における利根川砂試料とほぼ同じ条件である。本研究の結果と Yoshimi et al. (1984) の報告が異なる詳細な原因は不明であるが、供試体整形時から試験機にセットするまでの温度条件や実験手順の違いがその要因の一つとして考えられる。

表 5.3.1 利根川砂凍結試料の液状化試験結果

No.	融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	e	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰り返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxTon-F1	98	0.720	0.45	1.9	10	26
TxTon-F2	98	0.750	0.45	0.9	10	28
TxTon-F3	30	0.715	0.40	5.7	18	29
TxTon-F4	98	0.734	0.40	12	29	50
TxTon-F5	98	0.764	0.40	28	54	79
TxTon-F6	30	0.708	0.40	2.8	18	47
TxTon-F7	98	0.725	0.40	3.7	17	45
TxTon-F8	30	0.729	0.40	0.9	7.9	23

表 5.3.2 江戸川砂 A 凍結試料の液状化試験結果

No.	融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	e	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰り返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxEdo-A-F2	60	1.167	0.30	32	79	> 100
TxEdo-A-F3	60	1.157	0.40	0.8	3.6	6.4
TxEdo-A-F4	60	1.184	0.35	2.6	11	17
TxEdo-A-F5	10	1.189	0.35	0.6	1.0	2.8

表 5.3.3 江戸川砂 B 凍結試料の液状化試験結果

No.	融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	e	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰り返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxEdo-B-F1	98	0.838	0.40	6.9	15	20*
TxEdo-B-F3	30	0.811	0.40	5.5	13	16
TxEdo-B-F4	30	0.835	0.45	0.8	3.0	5.5
TxEdo-B-F5	98	0.815	0.45	1.5	5.5	8.6

表 5.3.4 江戸川砂 C 凍結試料の液状化試験結果

No.	融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	e	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰り返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)} = 1\%$	$\varepsilon_{v(DA)} = 3\%$	$\varepsilon_{v(DA)} = 5\%$
TxEdo-C-F2	30	0.710	0.33	6.7	12	14
TxEdo-C-F3	98	0.696	0.33	12	17	19
TxEdo-C-F4	98	0.818	0.28	65	76	83
TxEdo-C-F5	30	0.834	0.30	10	14	17
TxEdo-C-F6	98	0.773	0.30	12	17	21

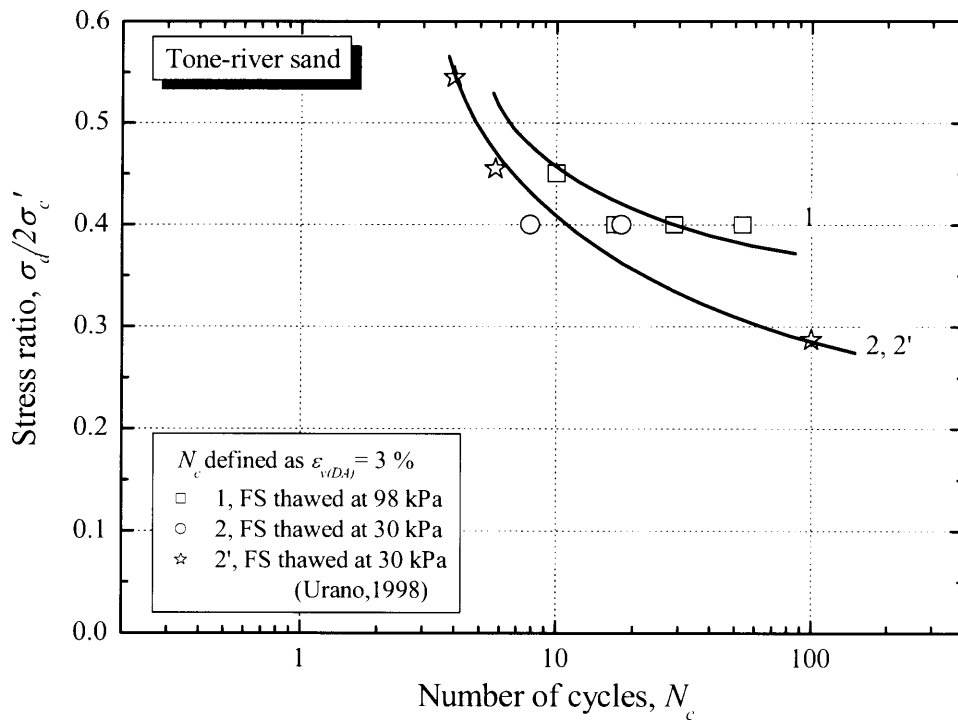


図 5.3.7 利根川砂凍結試料の液状化強度曲線

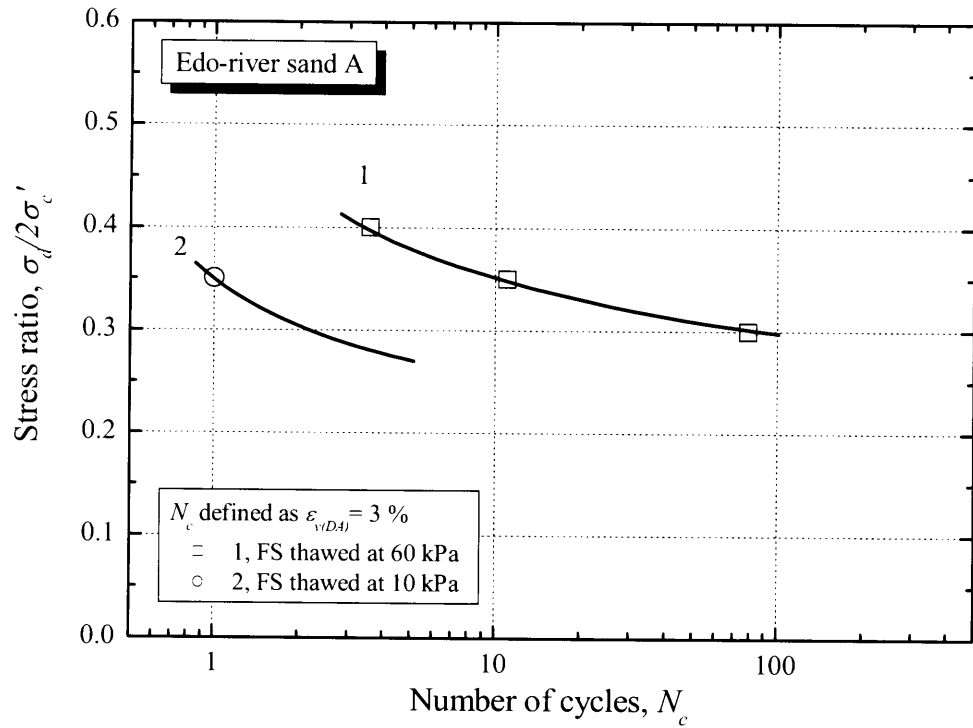


図 5.3.8 江戸川砂 A 凍結試料の液状化強度曲線

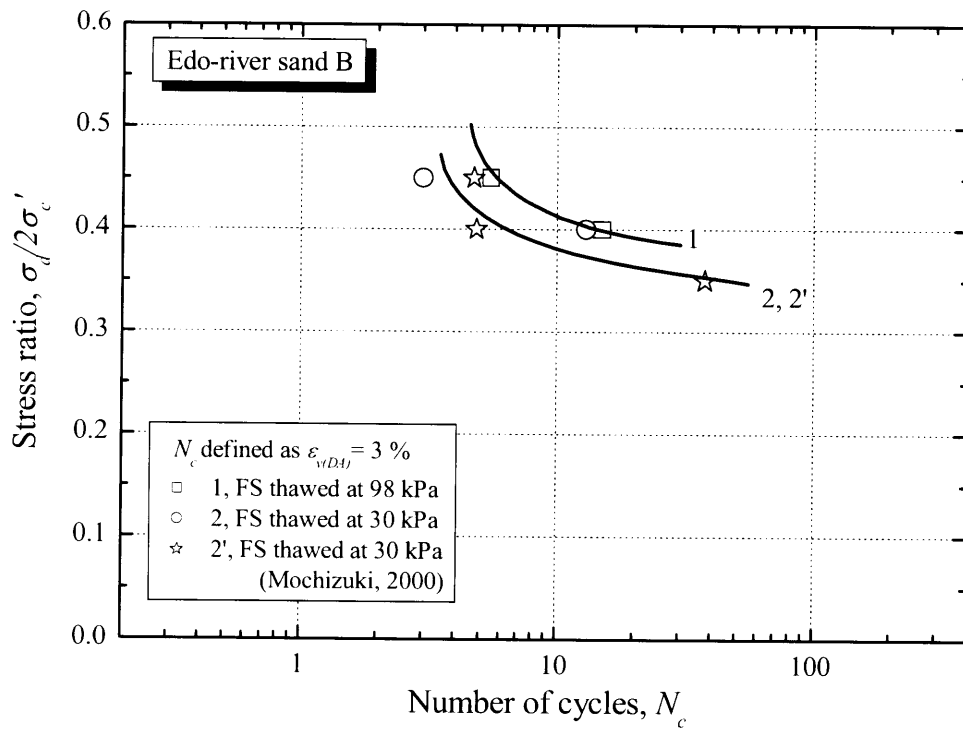


図 5.3.9 江戸川砂 B 凍結試料の液状化強度曲線

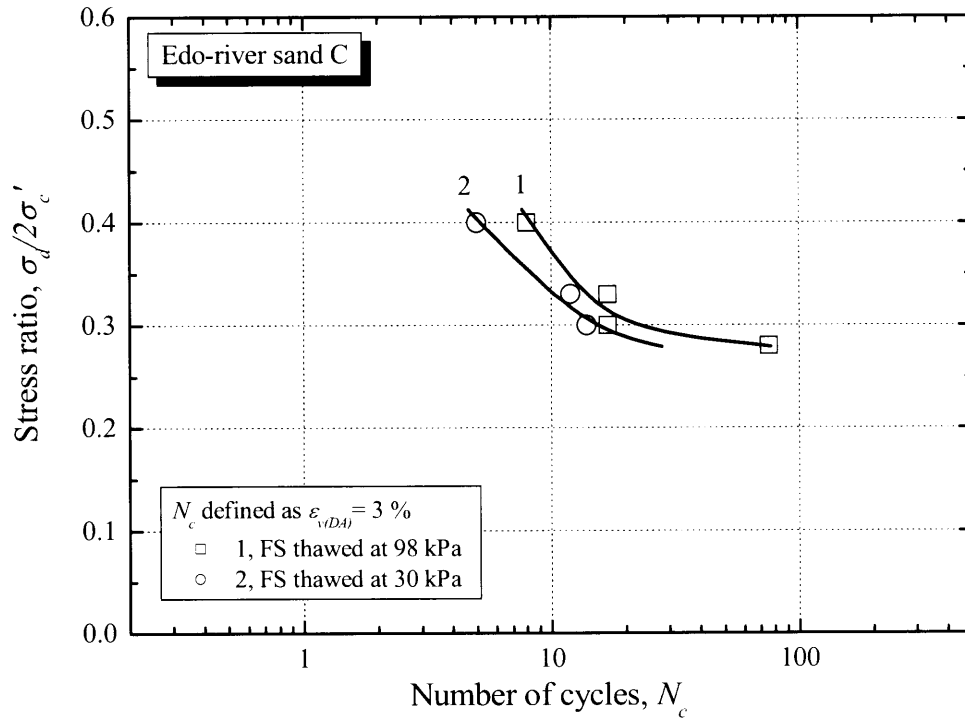


図 5.3.10 江戸川砂 C 凍結試料の液状化強度曲線

表 5.3.5 各凍結試料の液状化強度と平均初期微小変形特性

試料名	Test No.	融解拘束圧	液状化強度 R_{L15}	平均初期微小変形特性 (MPa)		
				E_{s0}	E_{d0}	G_{d0}
利根川砂 TxTon	F1,2,4,5,7	98	0.43	177.0	357.7*	109.6
	F3,6,8	30	0.37	171.4	320.7*	98.7
江戸川砂 A TxEdo-A	F2,3,4	60	0.34	51.3	256.2	29.3
	F5	10	-	43.1	194.5	23.9
江戸川砂 B TxEdo-B	F1,5	98	0.40	262.8	1166.0	127.6
	F3,4	30	0.37	255.1	1078.8	118.3
江戸川砂 C TxEdo-C	F3,4,6	98	0.32	375.0	1040.9* 1049.8	320.9
	F2,5	30	0.30	396.8	756.2* 1247.1	296.2

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

5.3.3 凍結試料の液状化過程における微小変形特性

本研究では、液状化試験中に静的および動的微小変形特性を計測している。なお、液状化試験中に微小変形特性を計測した箇所は、前節で示した有効応力経路および応力ひずみ関係にプロットしてある。静的ヤング率については、 LDT による静的非排水ヤング率 E_{su} から、異方性およびメンブレンペネトレーションの影響を考慮して変換された排水ヤング率 E_s^* を示した。また静的せん断剛性率については、 E_s^* より異方性の影響を考慮して変換された G_s^* を示した。これらの変換手法に関しては、第3章を参考にされたい。

(1) 利根川砂試料

利根川砂試料の高融解拘束圧試料の代表的な結果として、図 5.3.11 に TxTon-F4 試料の液状化試験中における静的ヤング率 E_s^* と動的ヤング率 E_d を示す。図中には初期微小変形特性もプロットしている。ここで示しているヤング率は鉛直方向に計測したものであるため、鉛直有効応力 σ_v' との関係を示した。また、動的ヤング率 E_d については、第4章で示したように、計測結果に間隙水の影響が現れている。したがって、定量的に信頼できる結果とはいえないが、ここでは参考値として示している。

全体的に、液状化に伴う有効応力の低下と共に、動的ヤング率 E_d 、静的ヤング率 E_s^* とも低下する傾向を示すが、 E_d の値は E_s^* と比較してばらつきが大きい。液状化中に静的ヤング率を計測した既往の研究では、液状化中の圧縮状態と伸張状態で液状化に伴うヤング率の低下の傾向が異なるとした報告 (Koseki et al. (1998, 1999)) があるが、本研究でも明確ではないが同様の傾向が認められる。

TxTon-F4 試料の静的・動的せん断剛性率 $G_s^* \cdot G_d$ について、平均有効主応力 p' によって整理した結果を図 5.3.12 に示す。液状化中の G_d を p' によって整理した例として、Tanizawa et al. (1994) および Goto et al. (1999) の報告があるが、本研究の結果をこれらと同様に p' で整理すると、三軸伸張状態の $G_s^* \cdot G_d$ の値は三軸圧縮状態よりも低い値を示す傾向が認められる。ここで、本研究では等方・異方応力状態においてせん断剛性率と良い関係を示すといわれている応力関数 $(\sigma_v' / \sigma_h')^{0.5}$ を用いて結果を整理した。応力関数 $(\sigma_v' / \sigma_h')^{0.5}$ は、中空ねじり・三軸試験によっていくつかの応力経路に沿って計測された静的せん断剛性率と、龍岡ら(1999)が提案した直交異方弾性モデルとの関係により、せん断剛性率の応力状態依存性を適切に説明できると提案された関数である (佐藤ら(1999))。この応力関数 $(\sigma_v' / \sigma_h')^{0.5}$ によって整理した液状化中の静的・動的せん断剛性率 $G_s^* \cdot G_d$ を図 5.3.13 に示すが、 p' で整理した場合よりも相関性の良い分布を呈しており、三軸伸張と圧縮状態の値の差も解消されている。また、特に動的せん断剛性率 G_d の結果は、 E_d 、 E_s^* 、 G_s^* と比較して非常にクリアな応力依存性を呈しており、 $(\sigma_v' / \sigma_h')^{0.5}$ と共に低下する G_d の値は、液状化直前の値から対数軸で概ね直線状に分布している。

静的剛性 E_s^* 、 G_s^* と動的ヤング率 E_d にばらつきが見られた原因としては、従来は微小繰り返

しを数回実施し、安定した応力-ひずみ関係より静的剛性 E_s^* を求めているのに対し、液状化試験中には繰返しは 1 回しか行われなかったことが考えられる。 G_s^* は E_s^* より変換されているため本質的に原因は同じである。また、 E_d については前章で検討したように、やはり間隙水の存在が測定精度に影響を与えている可能性が考えられる。一方、 G_d については飽和の影響も小さいため、比較的精度良く計測が行われたといえよう。

図 5.3.14 に、利根川砂 TxTon-F6 試料の液状化中における静的・動的微小変形特性を示す。TxTon-F6 試料の融解時拘束圧は $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa であったため、図中には $p' = 30 \sim 100$ kPa までの等方圧密過程の微小変形特性もプロットしている。等方圧密中と液状化試験中の各剛性を比較すると、概ね両者は同等、もしくは若干圧密中の方が高い値を示す。また、前述の TxTon-F4 と同様、特に G_d については応力関数 $(\sigma_v' \sigma_h')^{0.5}$ との非常にきれいな相関関係が得られている (図 5.3.14)。TxTon-F6 試料の等方圧密時に生じた軸ひずみ ε_v は約 0.16% であるのに対し、液状化中の動的計測は軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)} = 0 \sim 3$ % 程度の範囲で実施している。このことから、 $\varepsilon_v = 0 \sim 3$ % の範囲では、微小変形特性、特に動的せん断剛性 G_d は、ひずみ履歴よりも応力状態への依存度が高いと考えられる。

図 5.3.15~ 図 5.3.17 に、その他の利根川砂凍結試料 (TxTon-F1, F7, F8) の実験結果を示す。液状化に伴う微小変形特性の変化は、上述の傾向と似通っているが、試料によっては液状化初期段階において G_d の低下幅が若干大きくなる傾向が認められる。また、TxTone-F8 試料の液状化中の G_d (図 5.3.17 b) については等方圧密時よりもかなり小さな値となっており、同じ条件で実施した上記 TxTon-F6 試料の結果 (図 5.3.14 d) と異なる。なお、TxTon-F1 試料による液状化試験は、他の試料より大きな応力比振幅を与えているが、微小変形特性と応力状態の関係には、全体的な傾向に有意な差は認められなかった。

凍結試料の融解時拘束圧の違いが液状化中の微小変形特性に及ぼす影響を確認するため、比較的応力関数と良い相関が得られた動的せん断剛性率 G_d について、計測を実施した利根川砂凍結全試料の結果を図 5.3.18 に示す。なお、ここでは煩雑さを避けるため、等方応力状態 ($q = 0$ kPa) にて計測した値のみを示している。結果より、初期せん断剛性率 G_{d0} は供試体毎に異なり、融解時拘束圧が高い試料の方が G_{d0} は大きくなるが、有効応力の減少に伴い、 G_d の値は減少し、 $(\sigma_v' \sigma_h')^{0.5} = 60$ kPa 程度では試料の違いによる G_d の差はほとんどない。また、 G_d を G_{d0} で正規化した結果を図 5.3.19 に示すが、 $(\sigma_v' \sigma_h')^{0.5} = 50 \sim 60$ kPa 程度より、低い融解時拘束圧の試料の方が高い G_d/G_{d0} の値で推移している。これは、融解時拘束圧が高い試料では、剛性の低下が液状化初期において比較的急激に生じていることを示している。融解時拘束圧の違いが初期微小変形特性や液状化抵抗に影響を及ぼし、その原因は試料の乱れに起因する可能性を既に述べた。利根川砂は沖積層ではあるため、セメンテーションの効果は小さいと考えられるが、融解時拘束圧の高い試料は低い試料よりも土粒子構造の安定性は高いものと考えられる。また、融解拘束圧の高い試料が有している土粒子構造の安定性は液状化の比較的早い段階で失われる可能性

があると考えられる。

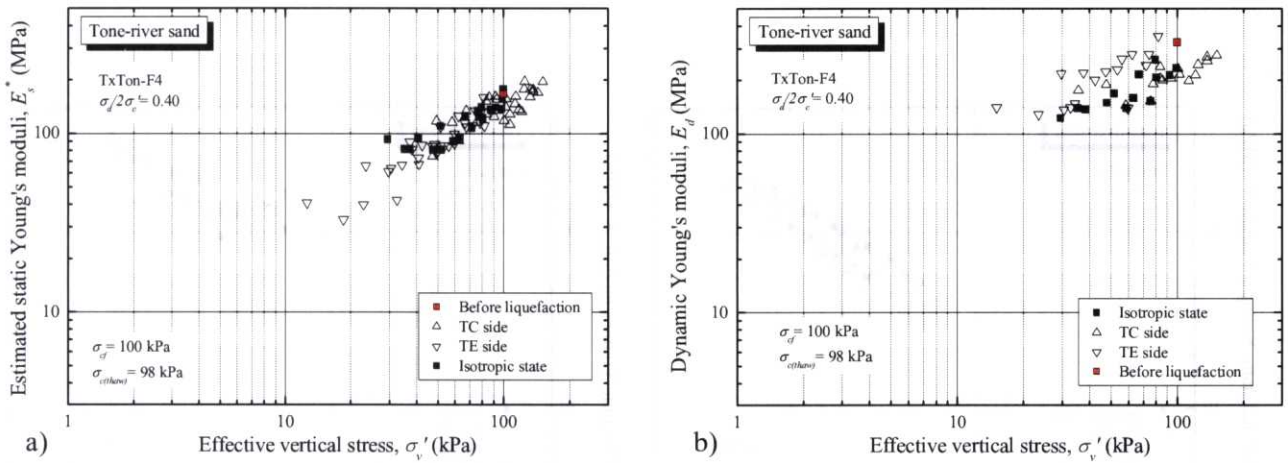


図 5.3.11 利根川砂試料 (TxTon-F4) の液状化過程における a) E_s^* , b) E_d

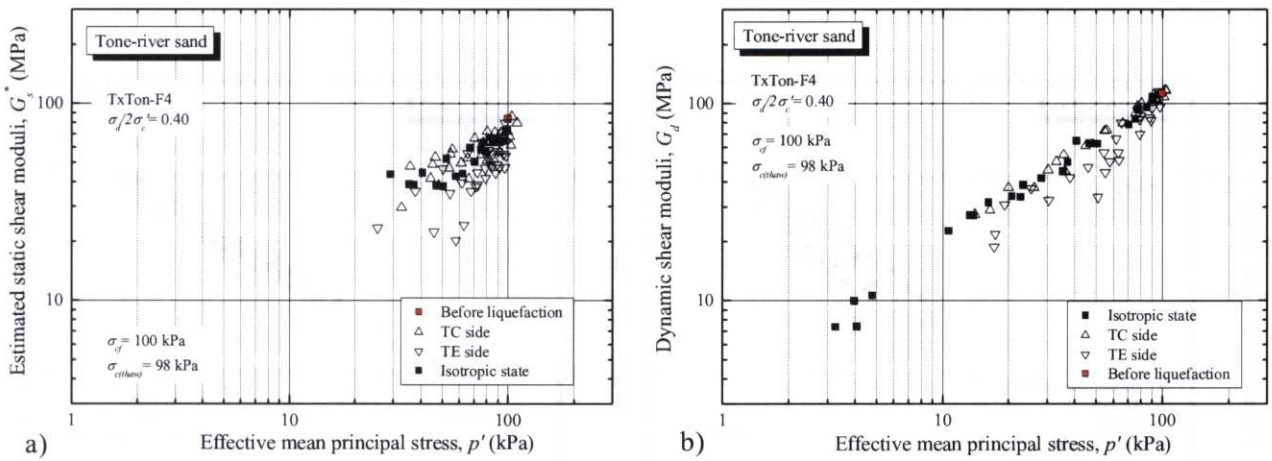


図 5.3.12 利根川砂試料 (TxTon-F4) の液状化過程における a) G_s^* , b) G_d その 1

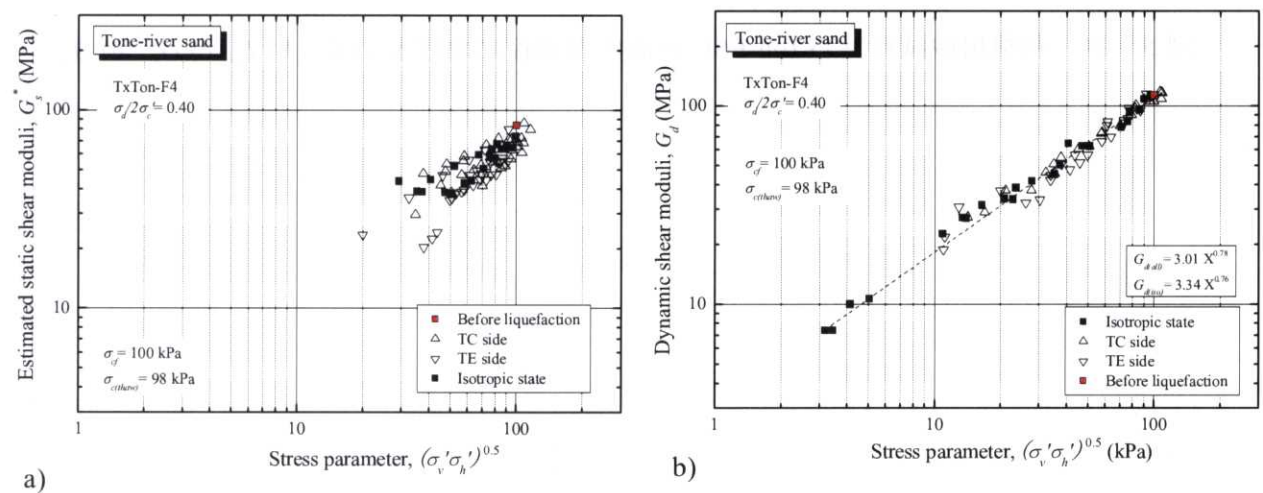


図 5.3.13 利根川砂試料 (TxTon-F4) の液状化過程における a) G_s^* , b) G_d その 2

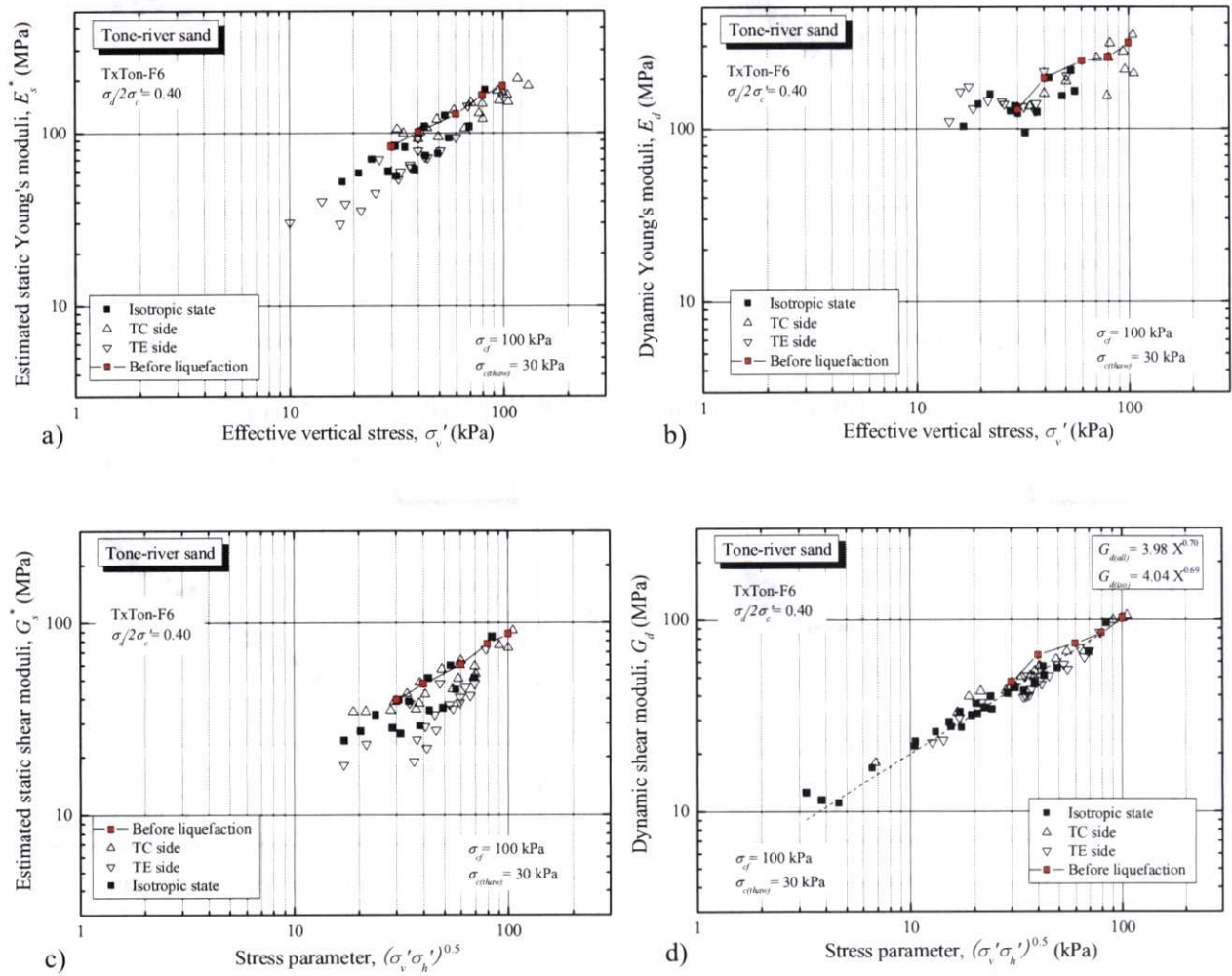


図 5.3.14 利根川砂試料 (TxTon-F6) の液状化過程における a) E_s^* , b) E_d , c) G_s^* , d) G_d

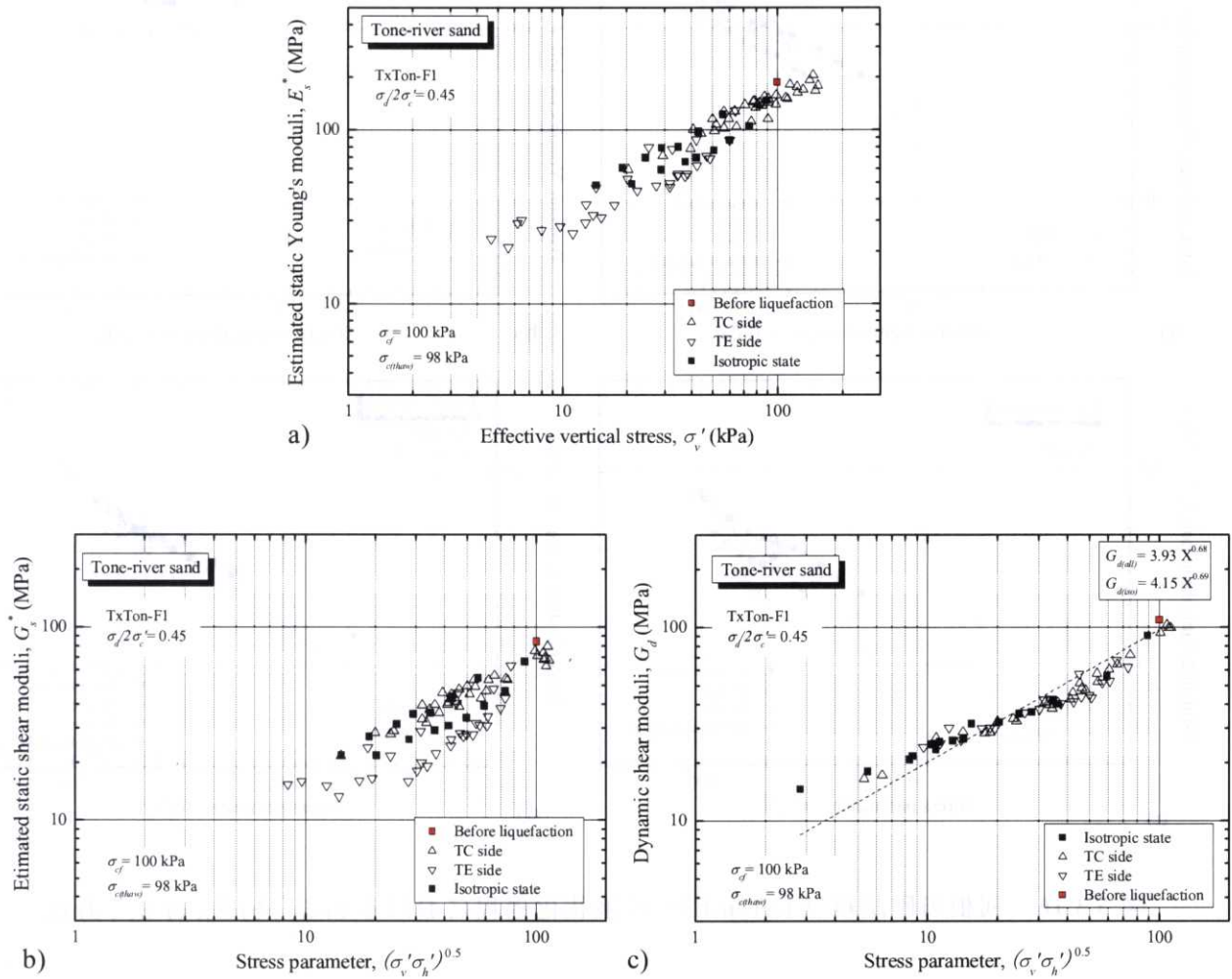


図 5.3.15 利根川砂試料 (TxTon-F1) の液状化過程における a) E_s^* , b) G_s^* , c) G_d

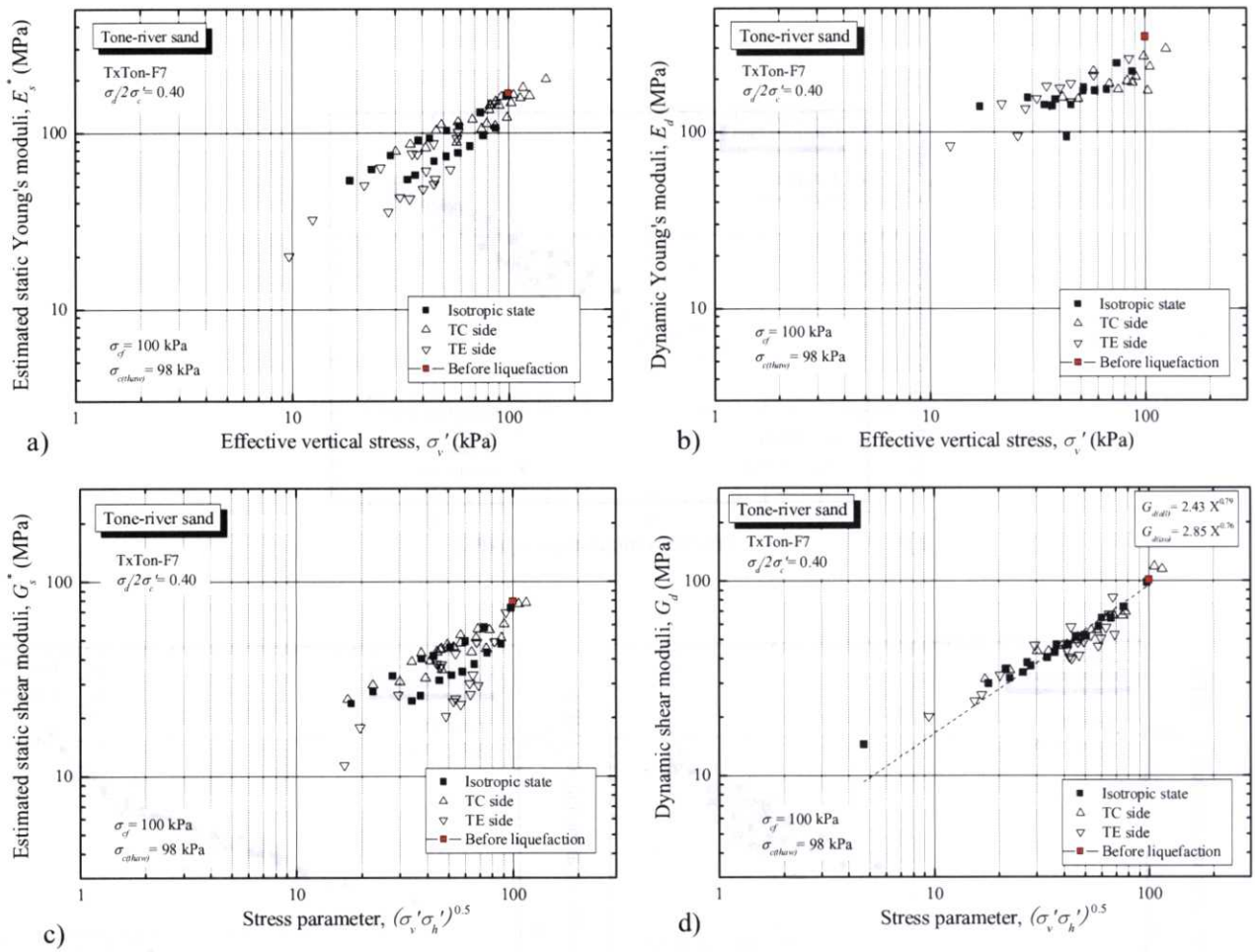


図 5.3.16 利根川砂試料 (TxTon-F7) の液状化過程における a) E_s^* , b) E_d , c) G_s^* , d) G_d

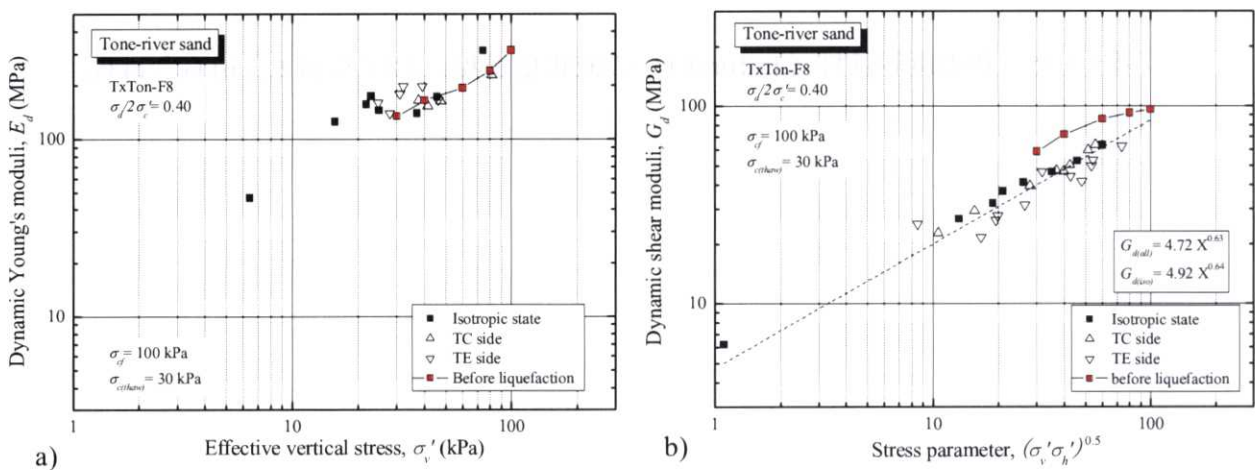


図 5.3.17 利根川砂試料 (TxTon-F8) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

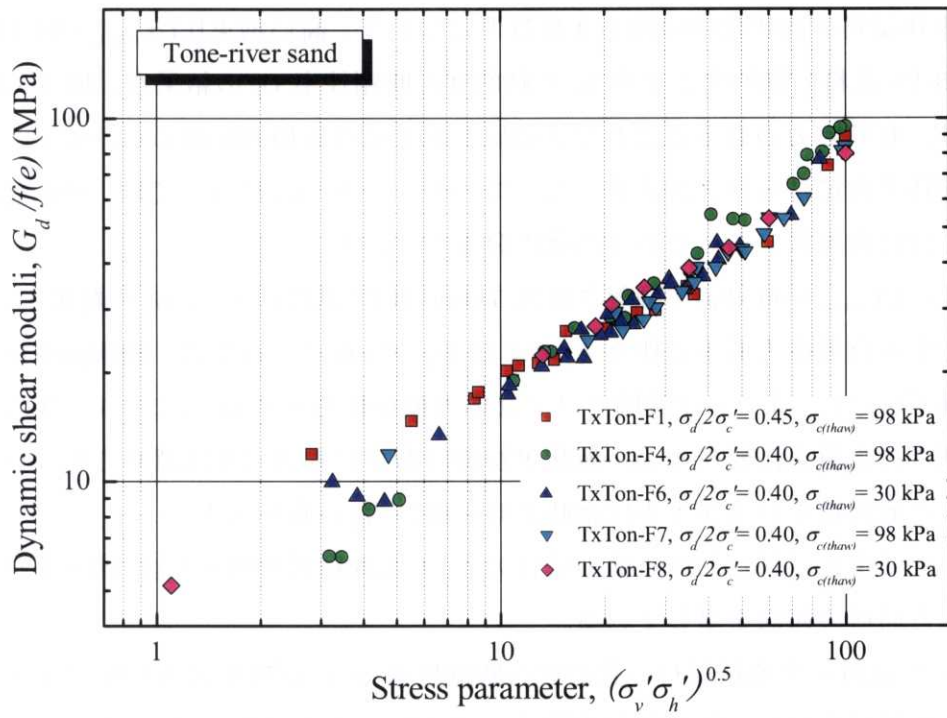


図 5.3.18 利根川砂凍結試料の液状化過程における G_d

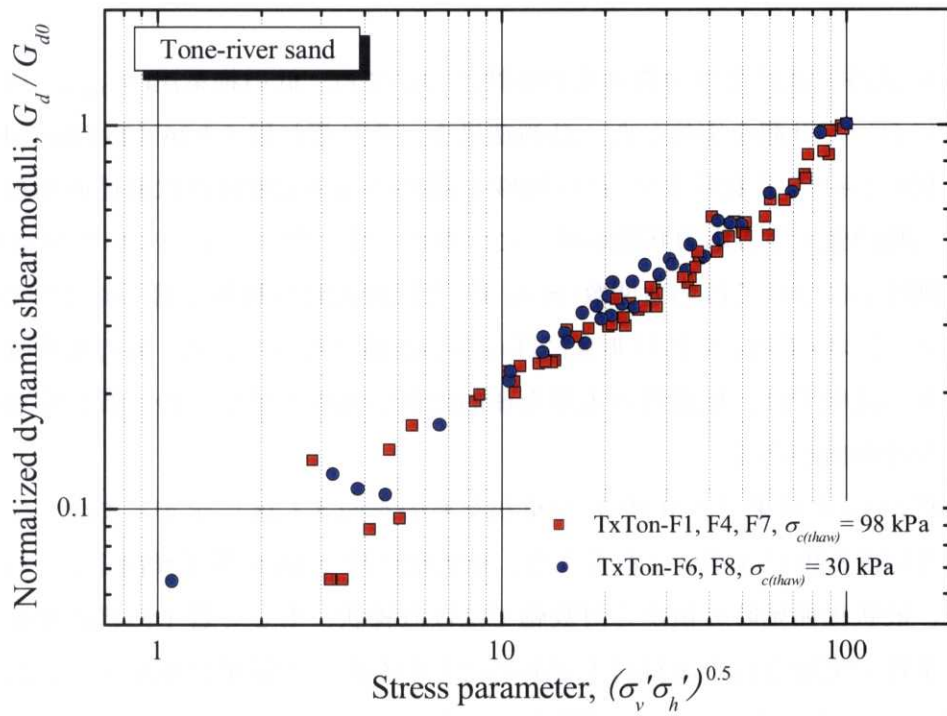


図 5.3.19 利根川砂凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

(2) 江戸川砂 B, C 試料

江戸川砂 B 試料の液状化中の微小変形特性について、高い拘束圧($\sigma_{c(thaw)}=98$ kPa)で融解された TxEdo-B-F5 試料の動的ヤング率 E_d と動的せん断剛性率 G_d の結果を、図 5.3.20 に示す。 E_d については、有効応力の低下とともにその値も小さくなる傾向が認められるが、前述の利根川砂試料と同様非常にばらつきが大きくなっている。一方、 G_d については、液状化開始時の値から対数軸でほぼ直線状、もしくは若干凸状に分布している。

低い拘束圧($\sigma_{c(thaw)}=30$ kPa)で融解された TxEdo-B-F3 試料の E_d と G_d の結果を、図 5.3.21 に示す。液状化中の有効応力低下に伴う E_d および G_d の分布については、融解拘束圧の高い試料との差は明確ではない。また、比較的クリアな応力依存性を示す G_d について、等方圧密時と液状化中に計測された値を比較すると、液状化初期段階では両者に差は認められないが、有効応力が低下すると液状化中の方が等方圧密時よりも低い G_d の値を示す。

また、江戸川砂 B 試料における他の試料の G_d の計測結果を図 5.3.22、図 5.3.23 に示すが、いずれも上記と同様の傾向を呈している。

江戸川砂 B 試料の全凍結試料の動的せん断剛性率 G_d の結果を図 5.3.24 に示す。なお、ここでは煩雑さを避けるため、等方応力状態 ($q=0$ kPa) にて計測した値のみを示している。結果より、初期動的せん断剛性率 G_{d0} は供試体毎に異なるが、全体的に有効応力の減少に伴う G_d の値はまとまった状態で分布し、 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いによる有意な差は認められない。また、 G_d を G_{d0} で正規化した結果 (図 5.3.25) についても、 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いによる影響は認められなかった。

江戸川砂 C 試料の液状化中の微小変形特性については、低い拘束圧($\sigma_{c(thaw)}=30$ kPa)で融解された二試料において計測を実施した。計測結果を、それぞれ図 5.3.26 (TxEdo-C-F2)、図 5.3.27 (TxEdo-C-F5) に示す。これらより、江戸川砂 C 試料の微小変形特性は前述の利根川砂と同様、三軸圧縮・三軸伸張・等方応力状態の違いにかかわらず、ヤング率については鉛直有効応力 σ_v' と、せん断剛性率については応力関数 $(\sigma_v'/\sigma_h')^{0.5}$ と比較的良い相関が得られている。しかし、動的ヤング率 E_d については、やはり非常にばらついた値となっている。等方圧密時と液状化時の微小変形特性の比較では、圧密時の方が全体的に高い剛性を呈し、特に低い応力状態ではその差が大きくなる傾向がある。

上記二試料の G_d の結果 ($q=0$ kPa) を重ねたものを図 5.3.28 に示す。また、 G_d を G_{d0} で正規化した結果を図 5.3.29 に示す。これらより、液状化に伴う G_d の低下傾向としては、江戸川砂 B 試料と同様、液状化開始時の値から対数軸でほぼ直線状、もしくは若干凸状に分布している。しかし、同じ条件で実施された試料同士であるにもかかわらず結果に差が生じており、全体的に TxEdo-C-F2 試料の方が TxEdo-C-F5 試料よりも高い G_d を示している。この原因としては、凍結試料自体のばらつきによるものと考えられ、表 5.3.4 に示した両者の間隙比の差にも表れている。

江戸川砂 B, C 試料において、液状化中の微小変形特性が等方圧密中の値よりも低くなった原因としては、年代効果の影響が考えられる。江戸川砂 B, C 試料は洪積層より採取されたものであり、年代効果の観点からは前述の利根川砂（沖積層）よりも初期状態の土粒子間の安定性は高いと考えられる。したがって、低い応力条件下の微小変形特性は、等方圧密時では年代効果が保持されている状態で計測されたものであるのに対し、液状化時はひずみ履歴により年代効果が失われていく過程で計測されたものであると考えられる。

江戸川砂 C 試料では、液状化中の微小変形特性の計測は、融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ が 30 kPa の試料だけで実施しているため、液状化による剛性の低下について $\sigma_{c(thaw)}$ の影響は検討できない。しかし、江戸川砂 B 試料の結果からは、 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いによる差はほとんど認められなかったことから、洪積層では液状化中の G_d に及ぼす $\sigma_{c(thaw)}$ の影響は小さいと考えられる。

本研究において実施した凍結試料における液状化中の G_d をまとめたものを、図 5.3.30 に示す。利根川砂、江戸川砂 B 試料では最終圧密応力が 100 kPa であったのに対し、江戸川砂試料では 160 kPa であったため、液状化開始応力が異なっており、各試料の G_{d0} の値も異なっている。また、図 5.3.31 には液状化中の G_d と $(\sigma_v' \sigma_h')^{0.5}$ をそれぞれの初期値 G_{d0} 、 $(\sigma_{v0}' \sigma_{h0}')^{0.5}$ で正規化した結果を示す。各試料の結果の違いは明瞭ではないが、液状化初期段階における江戸川砂 B, C 試料の結果は、利根川砂試料よりも高い値を示しており、各試料の液状化初期段階における G_d の低下傾向の違いが反映されているといえる。この結果から、土粒子間に十分なセメンテーションが発揮されている洪積試料では液状化に伴う剛性の低下は緩く、一方セメンテーションの効果が小さい沖積試料では、土粒子構造の安定により初期剛性が高くても、液状化の比較的早い段階において剛性が低下する傾向があると考えられる。

凍結試料による液状化試験結果のまとめとして、融解拘束圧の違いが、凍結試料の液状化強度、および微小変形特性に及ぼす影響を表 5.3.6 に示す。

表 5.3.6 融解拘束圧の違いが凍結採取試料の液状化強度および微小変形特性に及ぼす影響

試料名	液状化強度	初期微小変形特性 (液状化前)	微小変形特性 (液状化中)
利根川砂	○	○	△
江戸川砂 A	○	-	-
江戸川砂 B	△	△	×
江戸川砂 C	△	△	×

○：影響大、△：影響中、×：影響なし、-：データなし

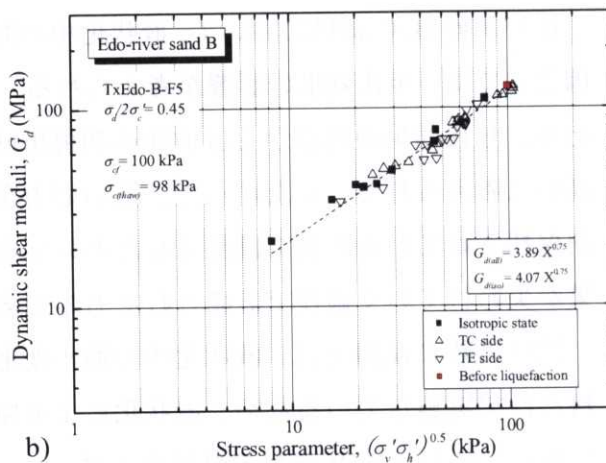
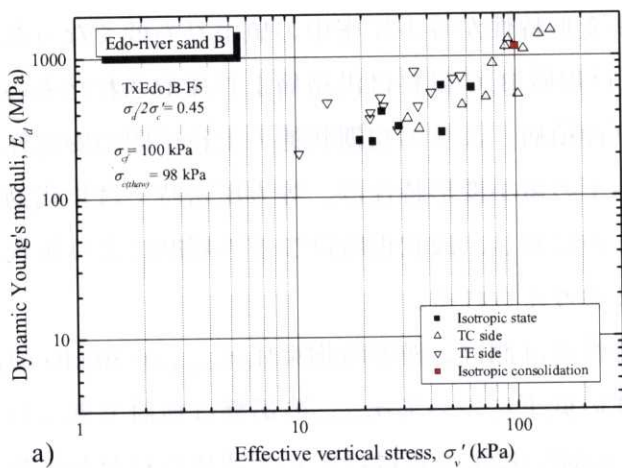


図 5.3.20 江戸川砂 B 試料 (TxEdo-B-F5) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

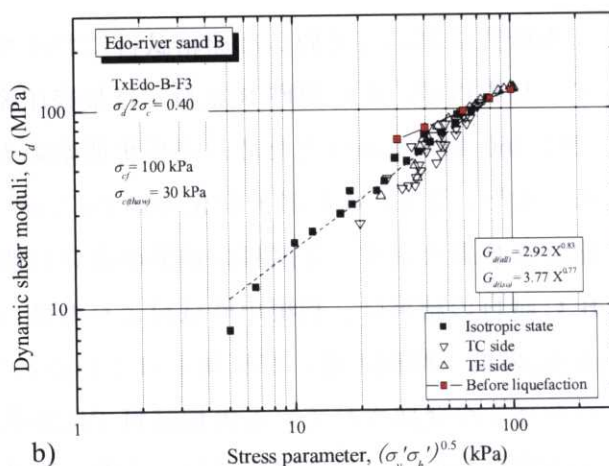
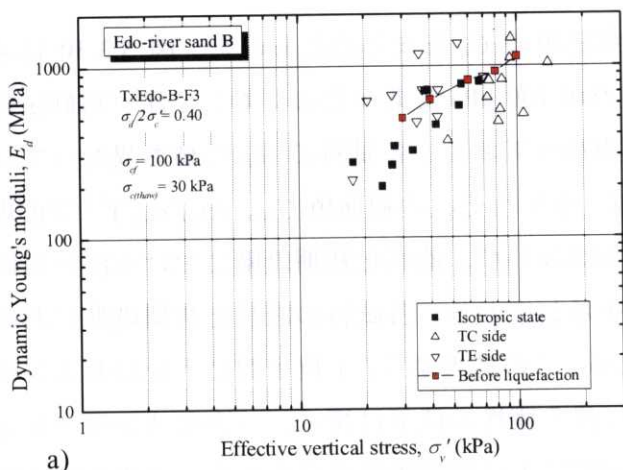


図 5.3.21 江戸川砂 B 試料 (TxEdo-B-F3) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

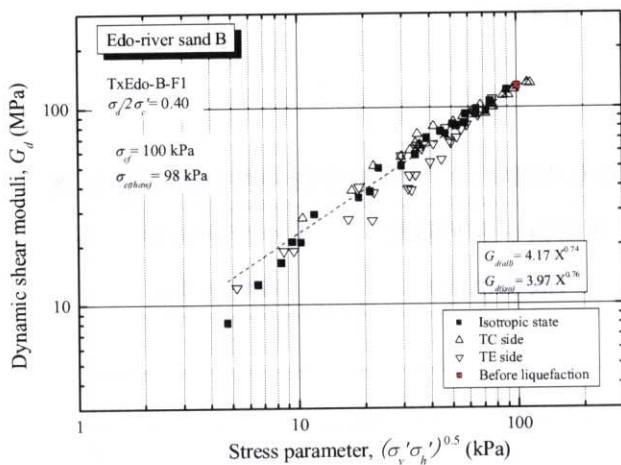


図 5.3.22 江戸川砂 B 試料 (TxEdo-B-F1) の液状化過程における G_d

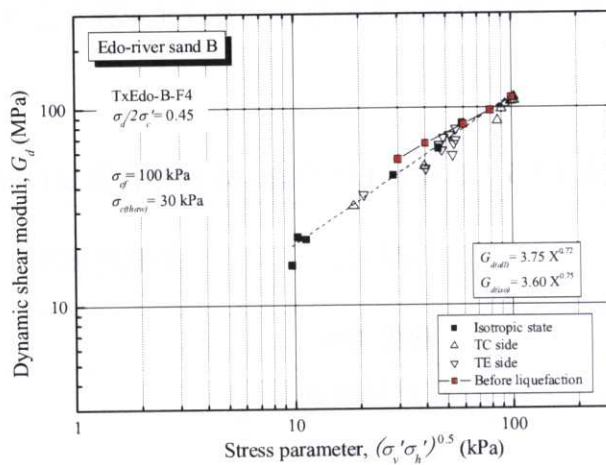


図 5.3.23 江戸川砂 B 試料 (TxEdo-B-F4) の液状化過程における G_d

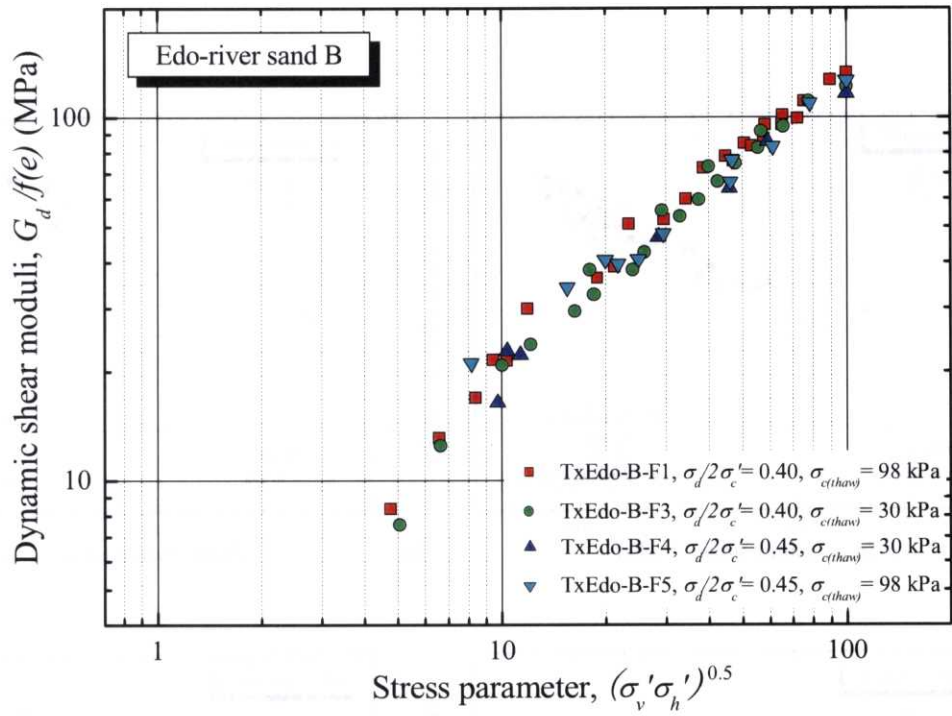


図 5.3.24 江戸川砂 B 凍結試料の液状化過程における G_d

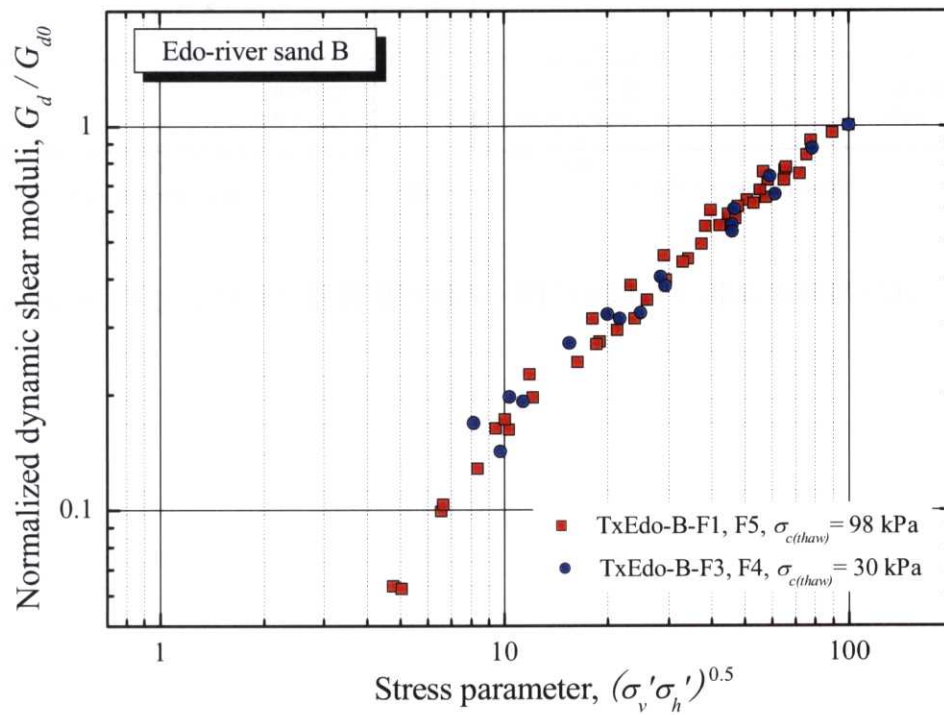


図 5.3.25 江戸川砂 B 凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

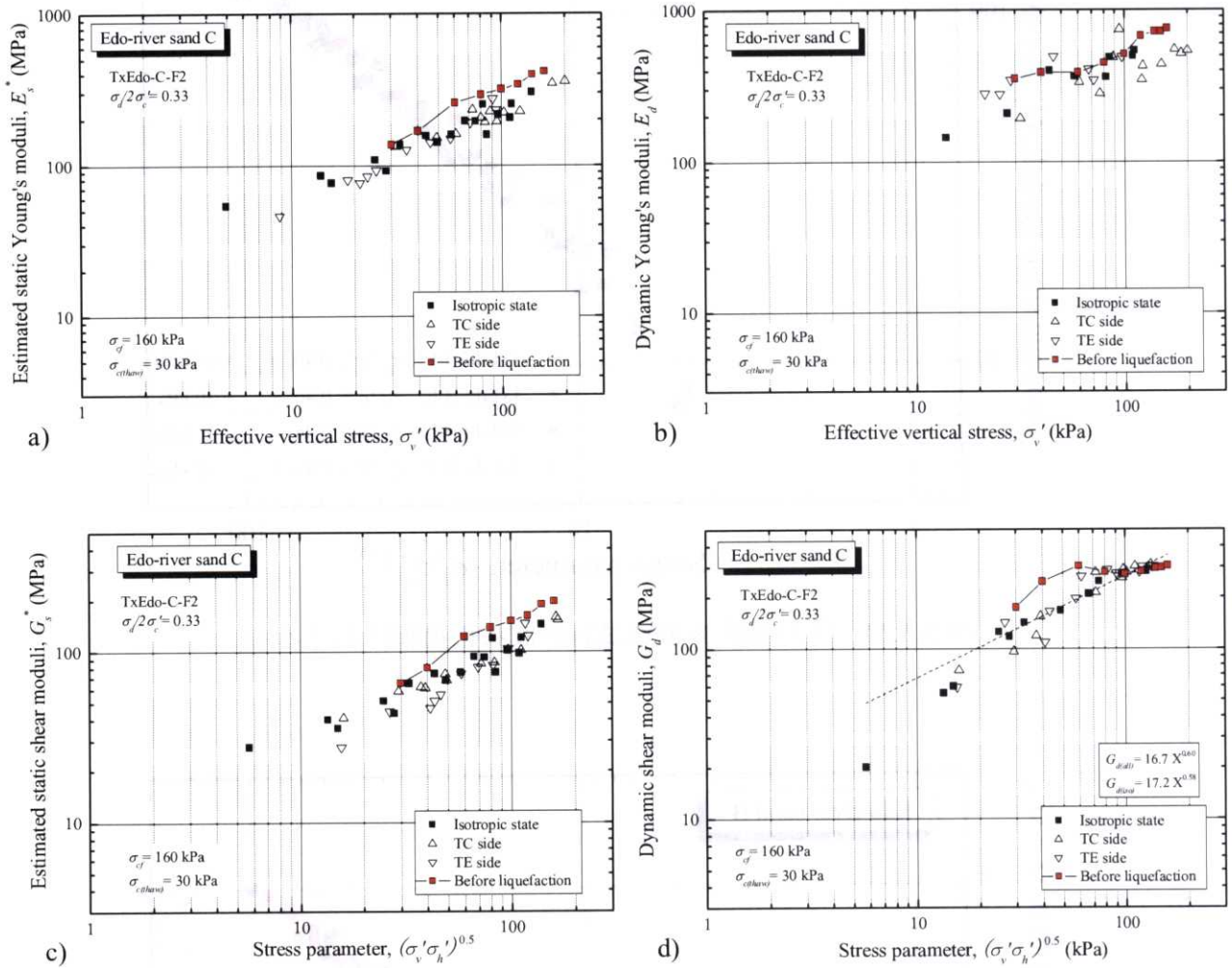
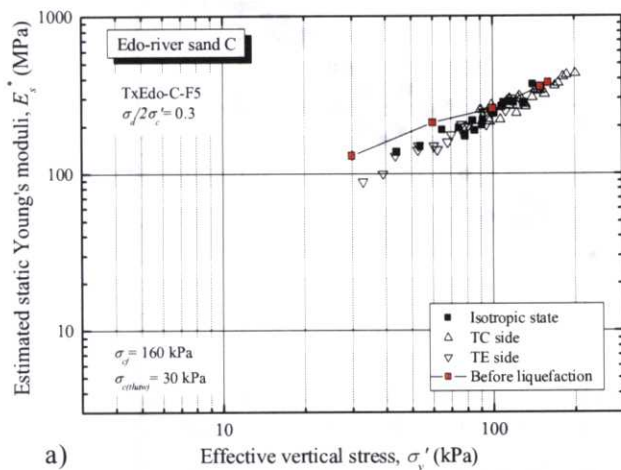
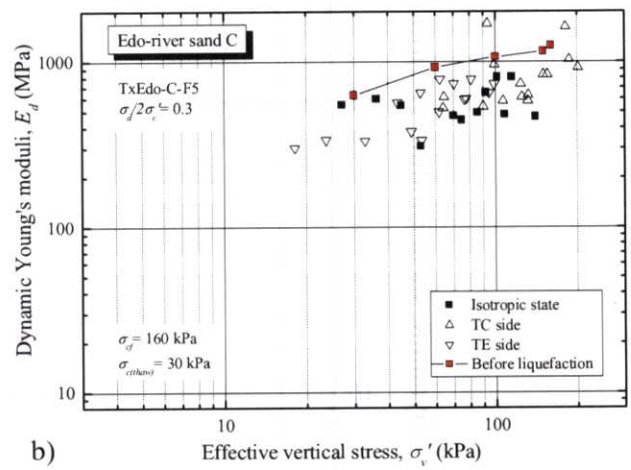


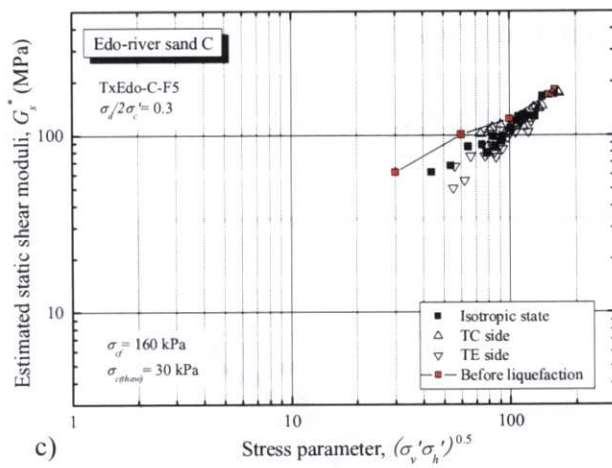
図 5.3.26 江戸川砂 C 試料 (TxEdo-C-F2) の液状化過程における a) E_s^* , b) E_d , c) G_s^* , d) G_d



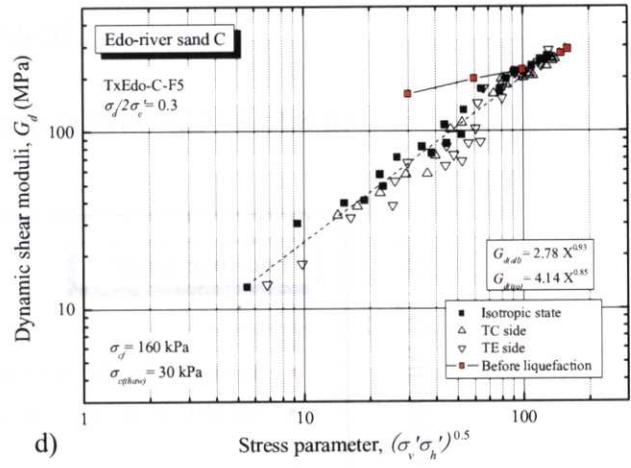
a)



b)



c)



d)

図 5.3.27 江戸川砂 C 試料 (TxEdo-C-F5) の液状化過程における a) E_s^* , b) E_d , c) G_s^* , d) G_d

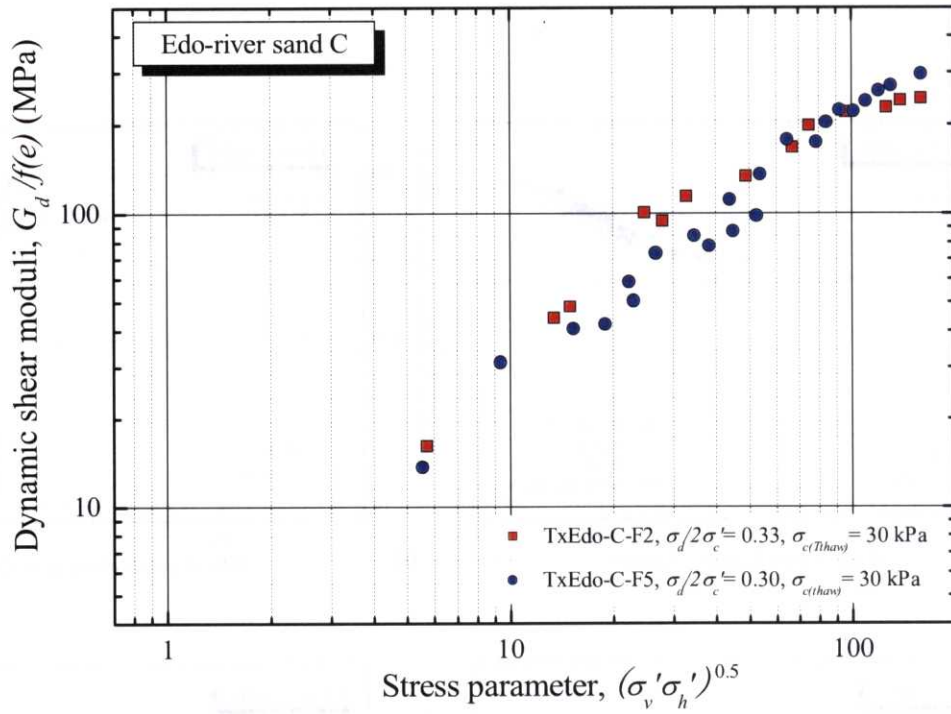


図 5.3.28 江戸川砂 C 凍結試料の液状化過程における G_d

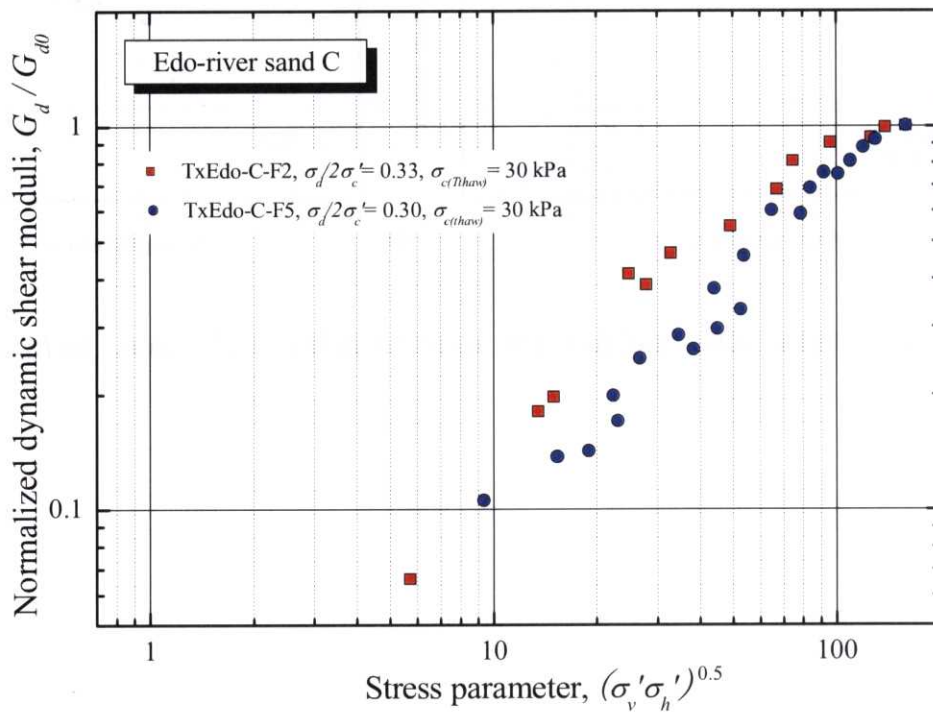


図 5.3.29 江戸川砂 C 凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

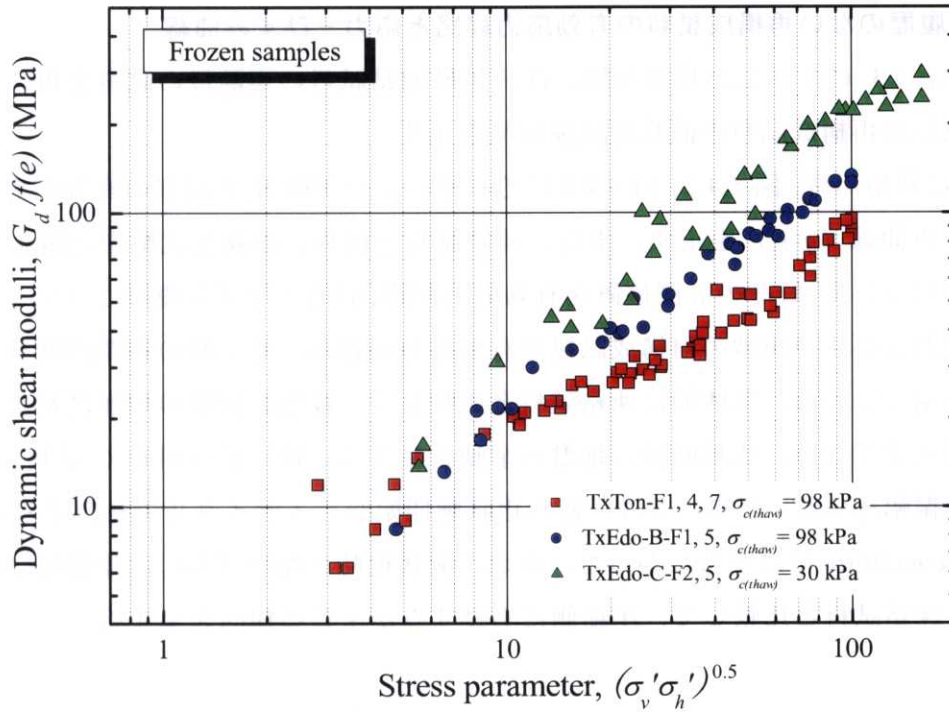


図 5.3.30 全凍結採取試料の液状化過程における G_d

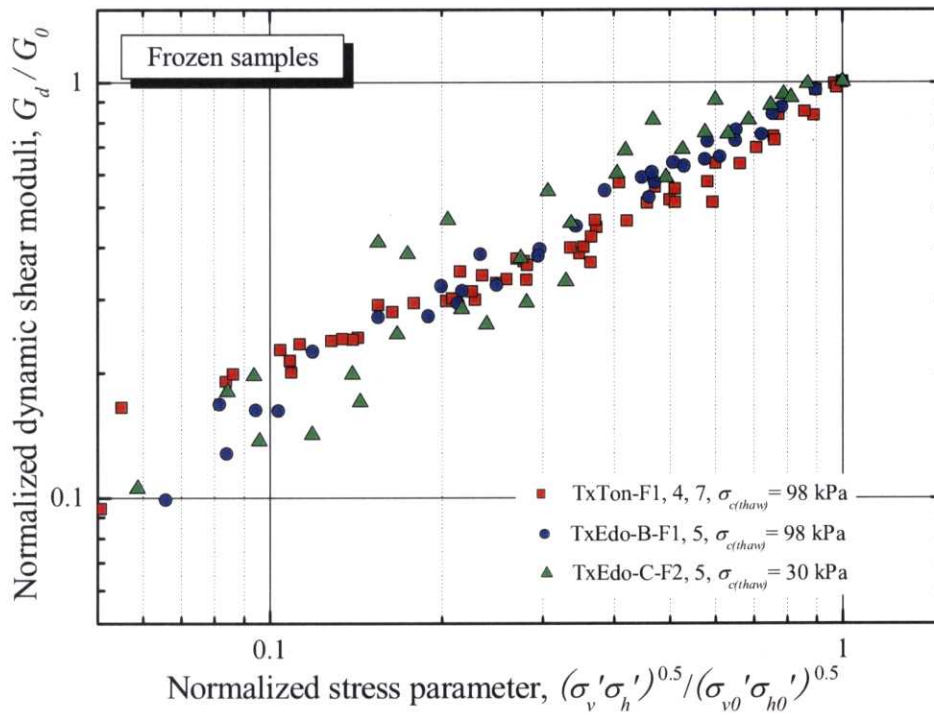


図 5.3.31 全凍結採取試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

5.4 応力履歴のない再構成試料の液状化特性

5.4.1 応力履歴のない再構成試料の有効応力経路と応力-ひずみ曲線

ここでは、5.3 にて示した利根川砂、江戸川砂凍結試料の実験後の試料を用いて、密度調節をして作成した再構成試料の液状化試験結果を示す。

図 5.4.1 に利根川砂、図 5.4.2、図 5.4.3 にそれぞれ江戸川砂 B, C 試料の有効応力経路 ($q-p'$)、応力-ひずみ曲線 ($q-\varepsilon_v$) を示す。また、凍結試料と同様、液状化試験中に微小変形特性を計測した試料については、その計測位置を有効応力経路、応力-ひずみ曲線にプロットしてある。

利根川砂および江戸川砂の再構成試料の有効応力経路は、せん断の初期段階から有効応力は低下傾向を示している。全体的に凍結試料と比較して、繰返し回数の増加に対する有効応力低下の程度は大きくなり、比較的緩い地盤の挙動を呈する。特に江戸川砂 C 試料の TxEdo-C-R1 試料 (応力振幅 $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.33$) では、液状化試験開始から 1 サイクルで軸ひずみ $\varepsilon_{v(D.A)}$ が 5 % を超え、*cyclic mobility* には至らなかった。なお、液状化時の軸ひずみ ε_v は伸張側に増加する傾向があるが、凍結試料と比較して、圧縮側にもひずみが生じる傾向を呈する。

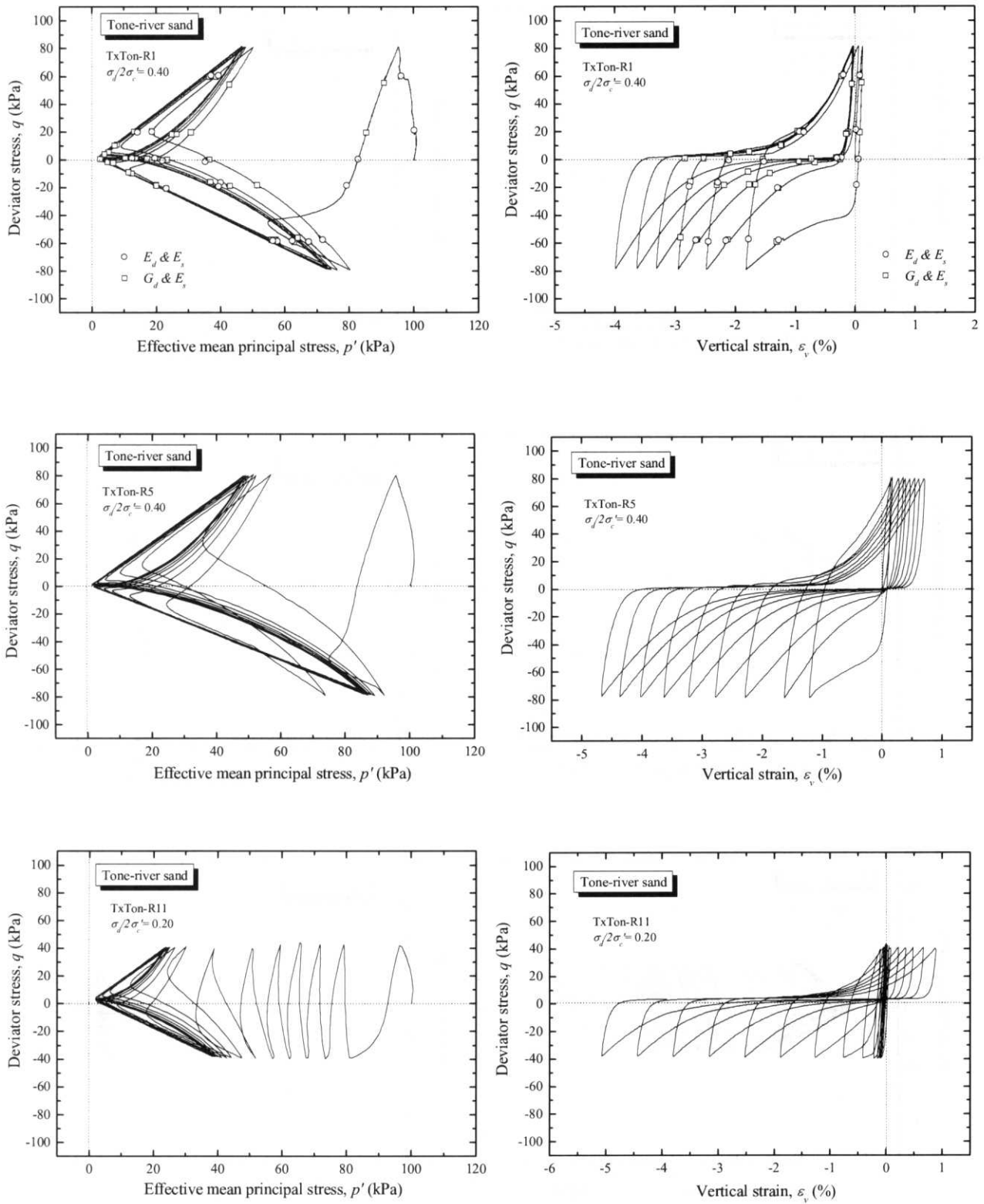


図 5.4.1 応力履歴のない利根川砂再構成試料の液状化試験結果
(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

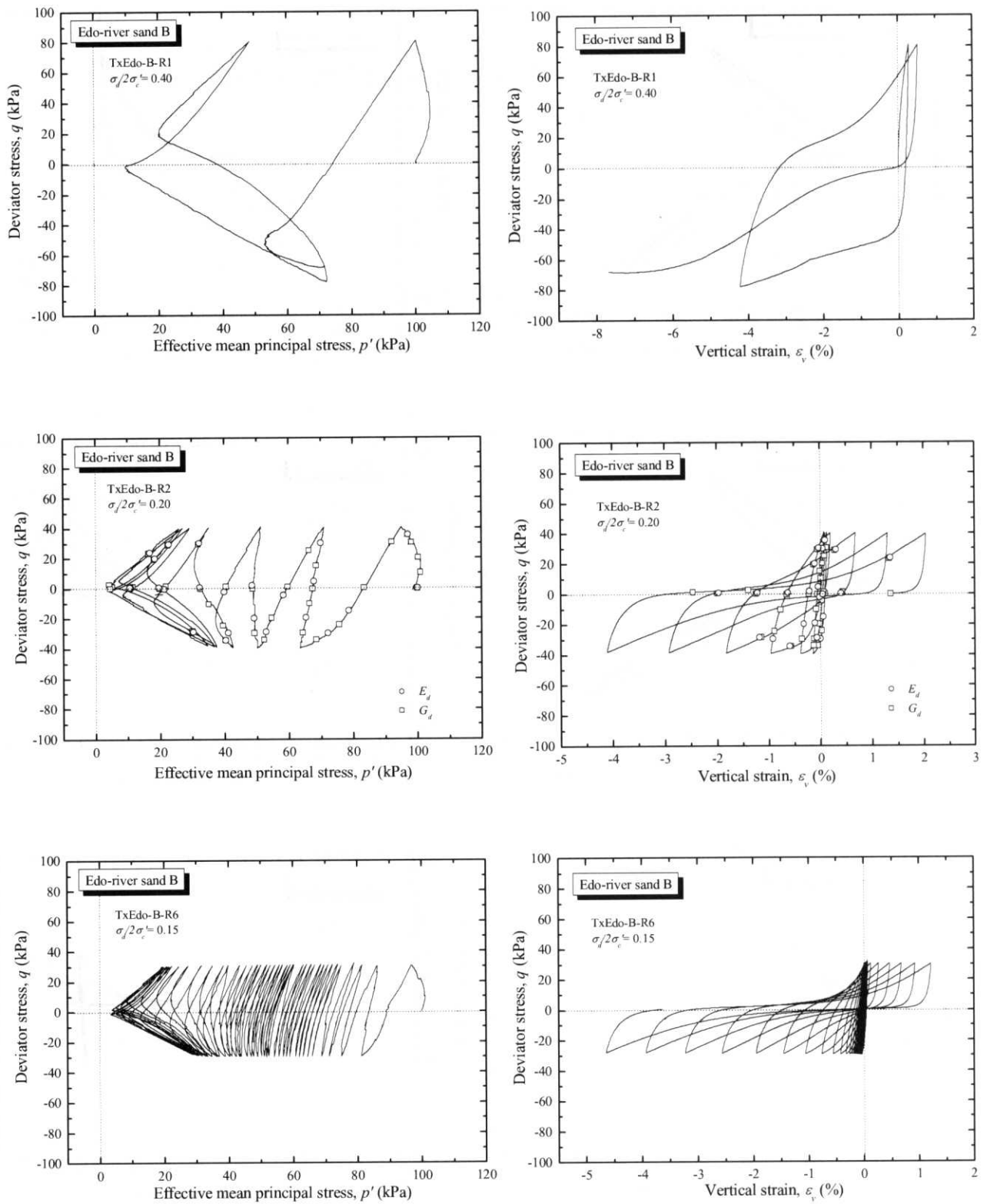


図 5.4.2 応力履歴のない江戸川砂 B 再構成試料の液状化試験結果
(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

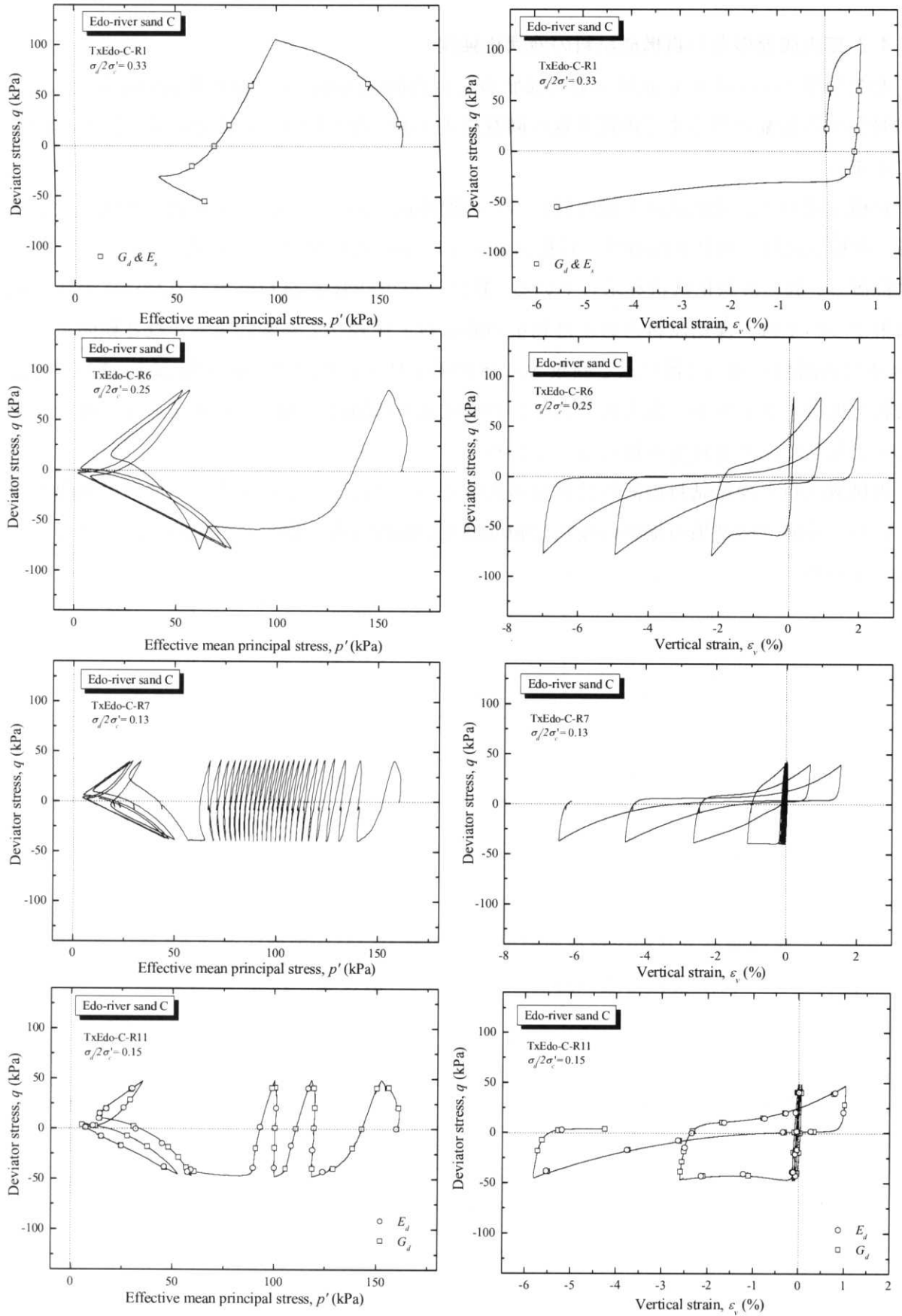


図 5.4.3 応力履歴のない江戸川砂 C 再構成試料の液状化試験結果
(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

5.4.2 応力履歴のない再構成試料の液状化強度

利根川砂・江戸川 B, C 試料の応力履歴のない再構成試料による液状化試験結果として、所定の軸ひずみ振幅に至るまでの繰り返し回数を表 5.4.1~表 5.4.3 に、液状化曲線を図 5.4.4~図 5.4.6 に示す。

再構成試料は、凍結試料と概ね同レベルの間隙比であったが、その液状化挙動は大きく異なる。再構成試料の液状化曲線は、利根川砂・江戸川砂 B, C 試料共に凍結試料と比較して左下側に位置し、低い液状化抵抗を示している。特に江戸川砂 B, C 試料における高い応力比振幅での結果については、凍結試料との差は利根川砂試料と比較して非常に大きくなる傾向にある。表 5.4.4 に各試料の R_{L15} （繰り返し回数 $N_c=15$ の時の所定の軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)}=3\%$ で定義した液状化抵抗）を示すが、応力履歴のない再構成試料の値は、融解時拘束圧の高い場合の凍結試料と比較して、半分程度の値になっている。

再構成試料と凍結試料の液状化強度の比較については、従来の研究でも同様の傾向が得られており、本研究の結果も地盤の液状化強度は土の粒度分布や密度だけでは決定できないことを示している。

表 5.4.1 応力履歴のない利根川砂再構成試料の液状化試験結果

No.	e	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰返し回数 N_c		
			$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxTon-R1	0.720	0.40	0.7	3.5	9
TxTon-R5	0.709	0.40	0.8	3.9	8.1
TxTon-R11	0.764	0.20	7.77	11	13

表 5.4.2 応力履歴のない江戸川砂 B 再構成試料の液状化試験結果

No.	e	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰返し回数 N_c		
			$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxEdo-B-R1	0.740	0.4	0.6	0.8	1.5
TxEdo-B-R2	0.830	0.2	3	4.7	5.8
TxEdo-B-R6	0.828	0.15	33	36	38

表 5.4.3 応力履歴のない江戸川砂 C 再構成試料の液状化試験結果

No.	e	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰返し回数 N_c		
			$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxEdo-C-R1	0.755	0.33	0.5	0.6	0.7
TxEdo-C-R6	0.696	0.25	0.7	1.4	1.9
TxEdo-C-R7	0.715	0.13	25	26	27
TxEdo-C-R11	0.727	0.15	2.7	3.2	3.7

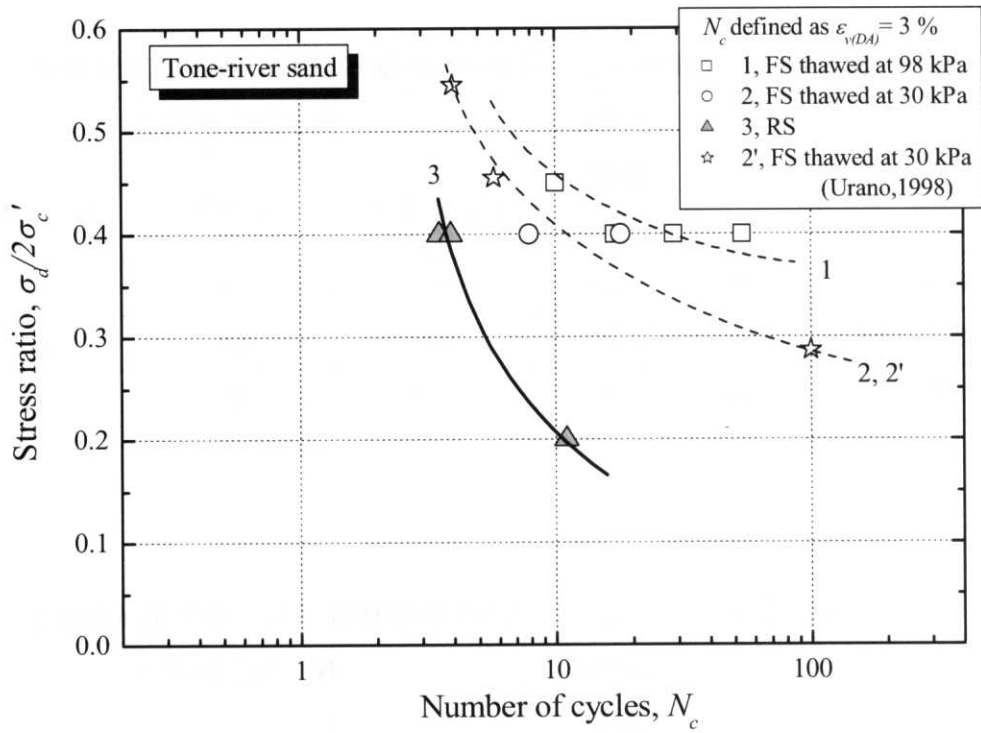


図 5.4.4 応力履歴のない利根川砂再構成試料の液状化強度曲線

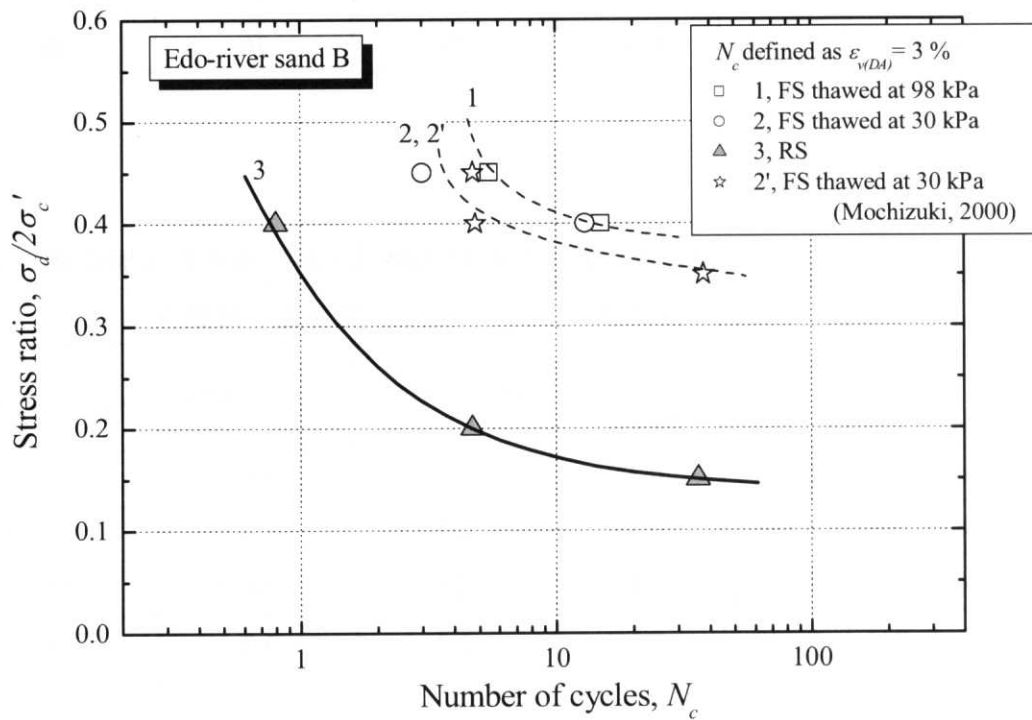


図 5.4.5 応力履歴のない江戸川砂 B 再構成試料の液状化強度曲線

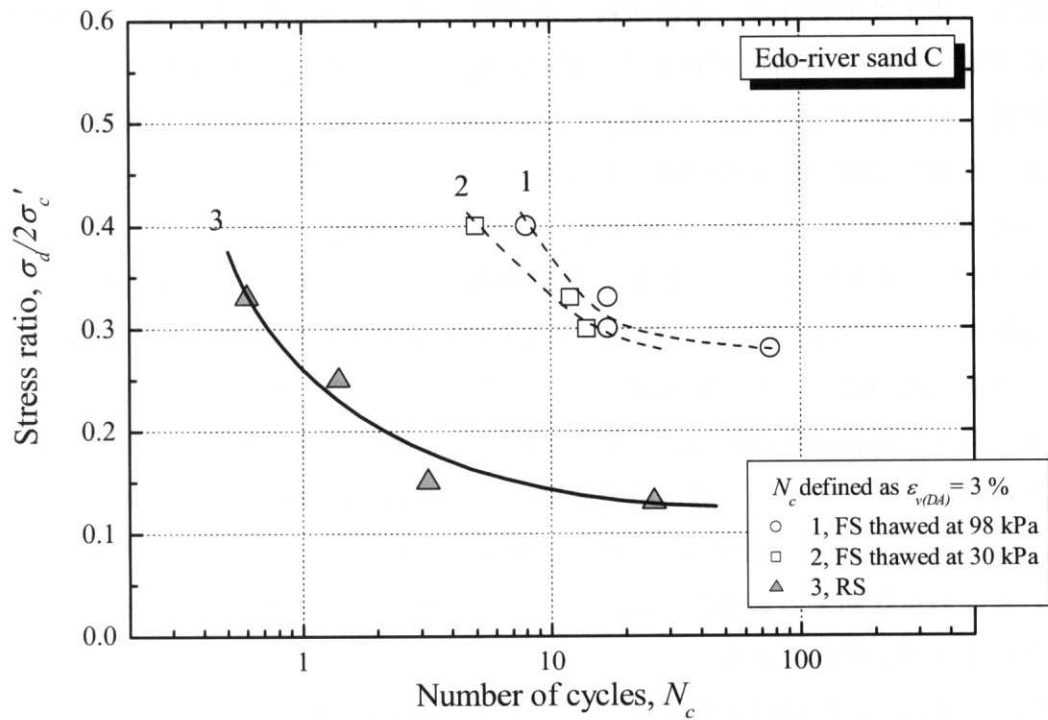


図 5.4.6 応力履歴のない江戸川砂 C 再構成試料の液状化強度曲線

表 5.4.4 応力履歴のない各再構成試料の液状化強度と平均初期微小変形特性

試料名	Test No.	液状化抵抗 R_{L15}	平均初期微小変形特性 (MPa)		
			E_{s0}	E_{d0}	G_{d0}
利根川砂 TxTon	R1, 5, 11	0.17	156.8	301.3*	85.3
江戸川砂 B TxEdo-B	R1, 2, 6	0.16	171.5	582.6	91.2
江戸川砂 C TxEdo-C	R1, 6, 7, 11	0.14	241.7	993.6	158.6

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果