

第4章

砂質土の微小変形特性に影響を及ぼす諸要因

4.1 概説

本章では、原地盤より採取された砂質土の微小変形特性に及ぼす凍結融解履歴、繰返し応力履歴等の影響を検討する。

原地盤より採取された凍結試料は年代効果を保持しているものと考えられるが、ここでは微小変形特性に反映される結果から、年代効果の影響について考察を行った。供試体の凍結融解履歴の影響については、凍結採取試料および室内で凍結させた再構成試料を異なる拘束圧にて融解させ、融解時のひずみの時刻歴を計測した。また、融解時拘束圧と微小変形特性との関連性を求め、原位置において実施されたPS検層結果も考慮して融解時拘束圧の低下に伴う凍結試料の乱れの影響を検討した。また、凍結試料の年代効果を再現するため、密度調節された再構成試料に繰返し応力履歴や等方クリーブ履歴を与え、その微小変形特性を計測した。

ここでは、年代効果としては、応力履歴によって形成される「土粒子構造の安定化」と、続成作用による「セメンテーション効果」があるものと仮定している。しかし、自然地盤の年代効果を定量的に把握する方法は確立されていない。本章では、一軸圧縮試験を実施することにより、各凍結試料と再構成試料のセメンテーション効果について考察を加えた。

4.2 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。

4.2.1 凍結融解履歴と体積変化に関する研究

凍結サンプリングに着目した室内試験による凍結試験の先駆的な研究は、Yoshimi et al.(1978)により実施された。Yoshimi et al. (1978) は細粒分の比較的少ない三種類の砂試料を用いて、側方変位を拘束した一次元凍結試験により試料の凍結時の体積変化を計測した。結果を図4.2.1 a)に示すが、細粒分が5%以下で有効上載圧が 0.3 kg/cm^2 ($\approx 29.4 \text{ kPa}$)以上であれば、凍結による膨張は0.1%以下となり、かつ凍結・融解中に地盤が排水状態を維持できれば、強度や変形特性に対する影響は無視できることを示した。また、凍結膨張量は凍結速度、試料の密度および透水性の低さに依存するが、有効上載圧が大きくなればその影響も小さいことを示している。しかし、図4.2.1 b)のように凍結膨張の挙動は地盤の種類によって異なり、必ずしも透水性や粒度だけでは説明できないと述べている。

また、Goto (1993)は、三軸試験機を用い、図4.2.2に示すように細粒分の種類と含有率を変化させて、凍結時の拘束圧と凍結体積ひずみとの関係を統計的に示した。また、きれいな砂の場合、拘束圧が20 kPa以上であれば凍結融解履歴による試料の乱れは生じないと報告した。更にGoto (1993)は、これら異なるタイプの試料の液状化強度と、凍結時の体積膨張量の関係から液状化強度に対する凍結試料の健全性について言及しているが、この詳細は次章にて述べる。

Yoshimi & Goto (1996)は、細粒分含有量を段階的に変えた再構成試料を用い、試料の凍結時と融解時の体積変化量を比較しているが、図4.2.3に示すように、両者の関係は定量的にも良く一致していることを示している。更に、後藤&田地 (1999)は、このような関係は凍結融解による残留ひずみが原位置の凍結膨張ひずみに比較して著しく小さいときのみ成立するとしている。また、この凍結融解による残留ひずみは凍結時に凍結面で発生する吸水力に起因した未凍結側の土の体積ひずみが主であるため、圧密によるひずみが小さい土では凍結膨張量と融解収縮量が近づく可能性が高いと指摘している。

望月(2001)は、本研究で用いている江戸川B試料と同じ箇所・深度 (GL-10.0~11.0 m) で採取された凍結試料を30 kPaの拘束圧で融解させ、その融解体積ひずみを測定している。更に、実験後の凍結試料を用い、密度調整して作成した再構成試料の凍結・融解体積ひずみを計測し、凍結試料の値と比較している。望月(2001)による江戸川砂B試料の融解ひずみ時刻歴を図4.2.4 a)に示すが、融解開始直後に収縮量のピークが存在し、その後残留状態に向かって定常化している。結果として融解ひずみにはばらつきがあるものの、凍結試料では軸ひずみ0.05%~0.18%、側方ひずみ0.08%~0.25%が計測された。また、図4.3.4 b)の再構成試料でも概ね同等の融解ひずみが確認されていることから、望月(2001)は、再構成試料は原位置の地盤状態をある程度再現

していると報告している。なお、再構成試料の凍結体積ひずみ（図4.2.5）は0.5 %程度となり、Goto, 1993による凍結ひずみと凍結試料の健全度の関係（次章に示す）より、当該試料の地盤凍結による乱れは少ないものと判断している。

一方、飯島(2002)は、望月(2001)の実験手法を踏襲し、名取川砂（洪積層, GL-16.25~16.85 m）と、本研究で用いている利根川沖積砂と同じ箇所・深度（GL-11.5~11.95 m）にて採取された凍結試料の融解体積ひずみ、およびそれらの再構成試料（30 kPaにて凍結）の凍結・融解体積ひずみを計測している。飯島(2002)による各試料の融解ひずみを図4.2.6に示すが、凍結試料では、比較的細粒分の多い利根川砂の方が名取川砂よりも融解ひずみは小さくなると報告している。また、再構成試料の融解時ひずみはいずれの試料とも凍結試料の結果と異なる値が計測されており、再構成試料同士の応力履歴の違いによる影響も現れていない。なお、この飯島(2002)による再構成試料の凍結ひずみの検討では、Goto, 1993による凍結試料の健全度の判定を用い、利根川砂試料の地盤凍結による乱れは大きいと判断している。

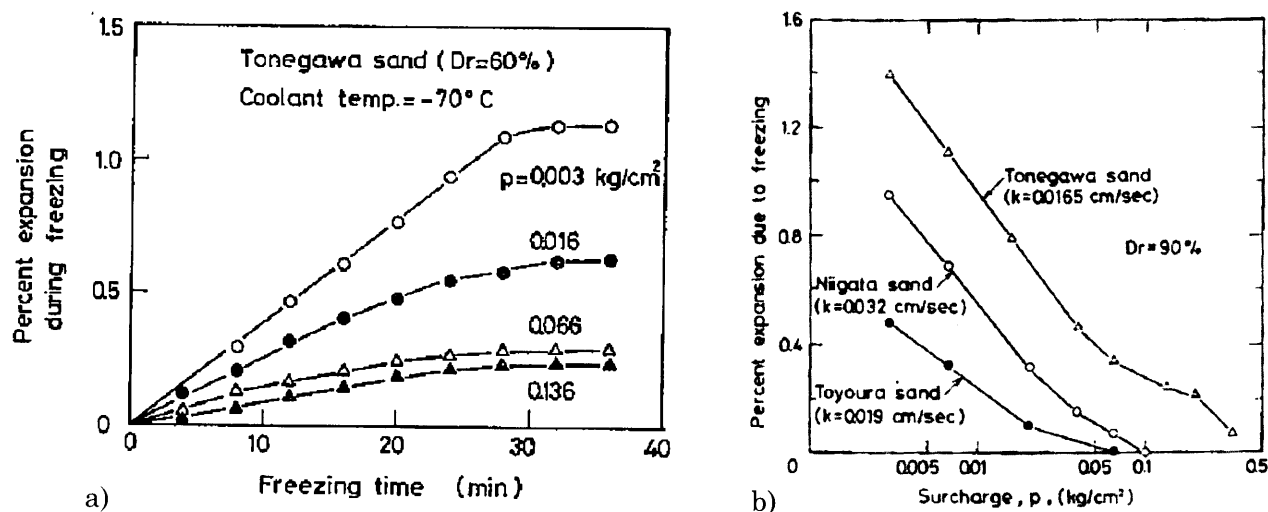


図 4.2.1 一次元凍結試験による上載荷重と凍結膨張ひずみの関係（Yoshimi et al., 1978）

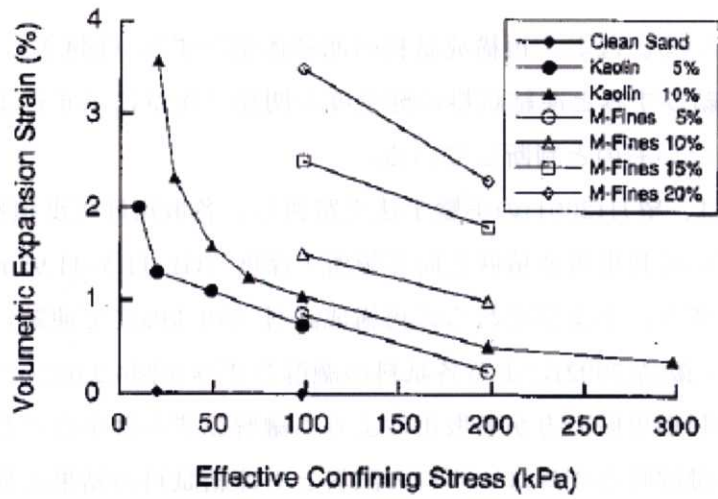


図 4.2.2 凍結・融解拘束圧と凍結膨張ひずみの関係 (Goto, 1993)

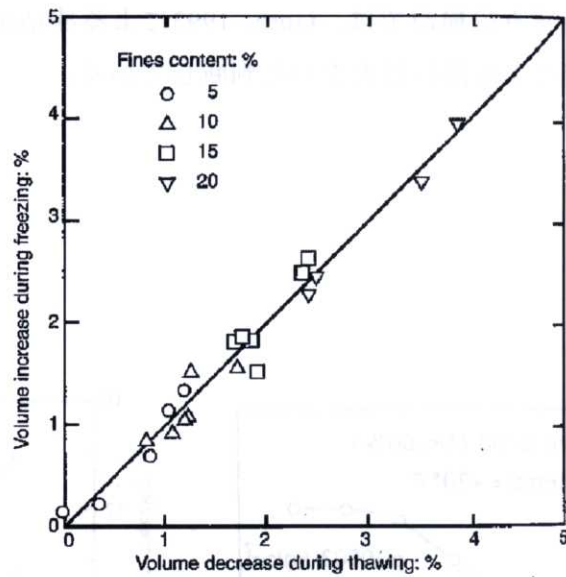


図4.2.3 凍結膨張量と融解収縮量の関係 (Yoshimi & Goto, 1996)

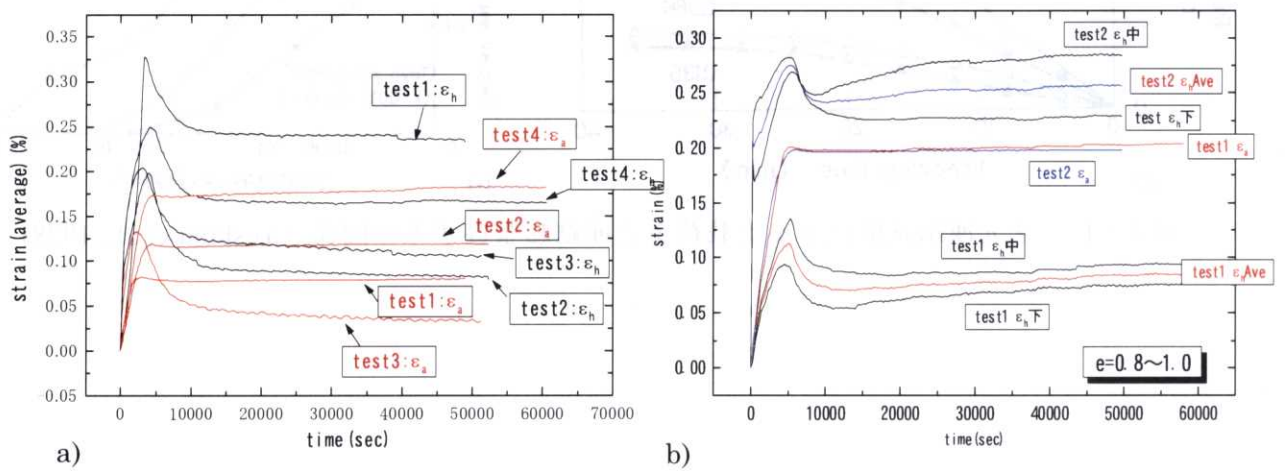


図4.2.4 a)凍結試料とb)再構成試料の融解時ひずみ時刻歴 (望月, 2001)

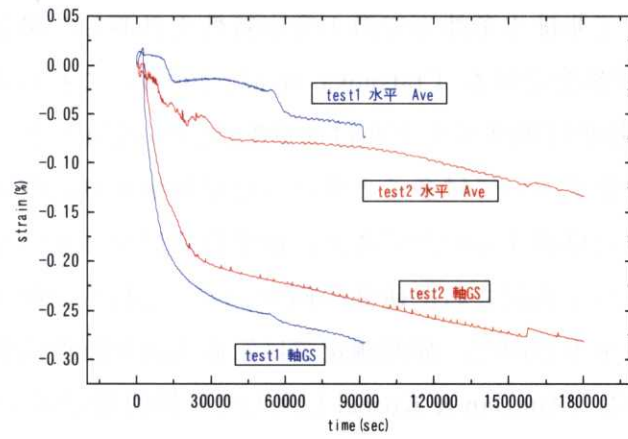


図4.2.4 再構成試料の凍結時ひずみ時刻歴 (望月, 2001)

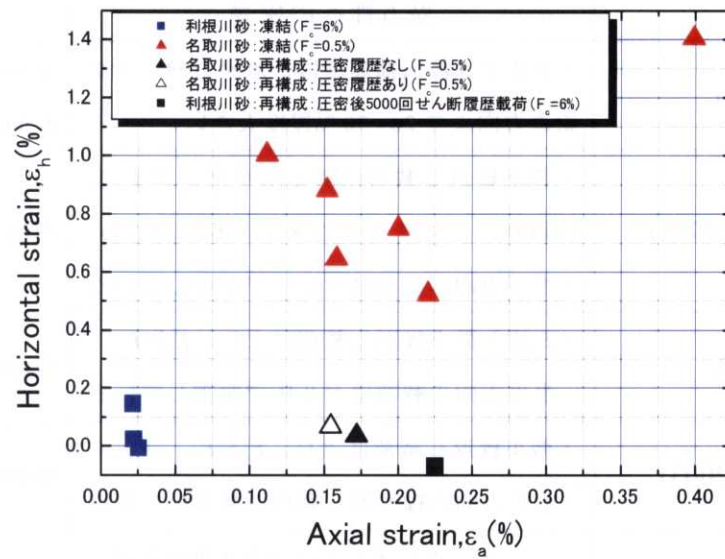


図4.2.5 凍結試料と再構成試料の融解終了時のひずみ (飯島, 2002)

4.2.2 微小変形特性に及ぼす構造異方性の影響に関する研究

三軸応力状態において非排水条件下で微小変形特性を計測した場合、ヤング率は応力状態異方性と構造異方性の影響を受ける (Tatsuoka et al., 1997)。これらの異方性を考慮したHoque (1996)による弾性変形特性に関するモデルは前章3.2において示した。しかし、地盤の微小変形特性に関する構造異方性については多くの異なった見解があり、微小変形特性が地盤の鉛直方向と水平方向のどちらに卓越するのかわからず、依然合意に至っていない。

表4.1.1に異方性について検討された研究の例を示す。これらの微小変形特性の計測手法を鑑みると、動的測定では水平方向に、静的測定では鉛直方向に剛性は卓越する傾向にある。しかし、AnhDan et al. (2002)とAnhDan & Koseki (2003)では静的測定同士でも結果は逆転しており、水平方向載荷手法（セル圧と載荷板の違い）の影響があった可能性も考えられている。

表 4.2.1 微小変形特性と構造異方性に関する既往の研究例

既往研究	異方性への影響	対象試料
Bellottii et al. (1996)	・ P 波と S 波伝播速度は、水平方向の方が鉛直方向より 20~30%程度大きい	Ticino sand (Medium dense & dense)
Hoque & Tatsuoka, (1998)	・ 微小繰返し載荷による水平ヤング率 E_h は鉛直ヤング率 E_v より 8~12%程度小さい ・ 水平方向の載荷はセル圧で制御している	豊浦砂
AnhDan et al. (2002)	・ P 波と微小繰返し載荷により、 $E_v \geq E_h$ ・ 水平方向の載荷はセル圧で制御している	豊浦砂と千葉礫 (Dense)
AnhDan & Koseki (2003)	・ 微小繰返し載荷により、 $E_v \leq E_h$ ・ 水平方向の繰返し載荷は載荷板を使用	豊浦砂と千葉礫 (Dense)
Yamashita et al. (2003)	・ ベンダーエレメントによる S 波速度は、 $G_{vh}/G_{hv} = 1.0$, $G_{hh}/G_{vh} = 1.1$	凍結砂試料
内田ら(2006)	・ 原位置クロスホール試験による S 波速度は水平方向 S_H のほうが鉛直方向 S_v より 10%程度大きい ・ 室内試験（凍結試料）による S 波速度は、水平方向供試体の方が鉛直供試体より 0~5%程度大きい	洪積砂質土層
平山ら(2006)	・ ベンダーエレメントによる S 波速度は、水平方向の方が鉛直方向より 2~3%程度大きい	不明

4.2.3 微小変形特性の応力状態依存性に関する研究

土の微小変形特性は応力依存性を有する。前章3.2に示したように、鉛直方向の排水ヤング率 E_v は鉛直方向 σ'_v の応力状態の関数であることがHoque (1996)によるモデルで示されている(式 [3.15])。このモデルの有効性は、円柱または角柱供試体を用いた既往の三軸試験結果 (e.g., 濱谷ら, 1997) でも確認されている。一方、せん断剛性率については、測定した面だけでなく、直交する面に作用する応力の影響も受けることが知られている。ベンダーエレメントにより動的せん断剛性率 G_d の応力依存性を計測したYamashita et al. (2003)は、 G_d は波動が伝わる方向と振動方向の応力の影響を受けると指摘している。また、これまでは、せん断剛性率の応力依存性については、 $p' = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$ で整理した報告が多く認められた (e.g., Tanizawa et al., 1994, Goto et al., 1999)。一方、佐藤ら(1999)は、中空供試体を用いて図4.2.6 a)に示すように4種類の応力経路 (①等方圧密、② $\sigma'_m = (\sigma'_v + \sigma'_h)/2$ 一定、③ $(\sigma'_v \sigma'_h)^{0.5}$ 一定、④ $p' = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$ 一定) に沿って静的せん断剛性率 G_s を求め、応力状態との関係について検討している。この実験により、佐藤ら(1999)は、②の $(\sigma'_v \sigma'_h)^{0.5}$ で整理する場合は G_s の応力状態依存性を最も適切に表現できることを示した (図4.2.6 b))。同様に、古関ら(2001)は、供試体にせん断応力が作用していても、その G_s は $(\sigma'_v \sigma'_h)^{0.5}$ によって適切に整理できることを示している。

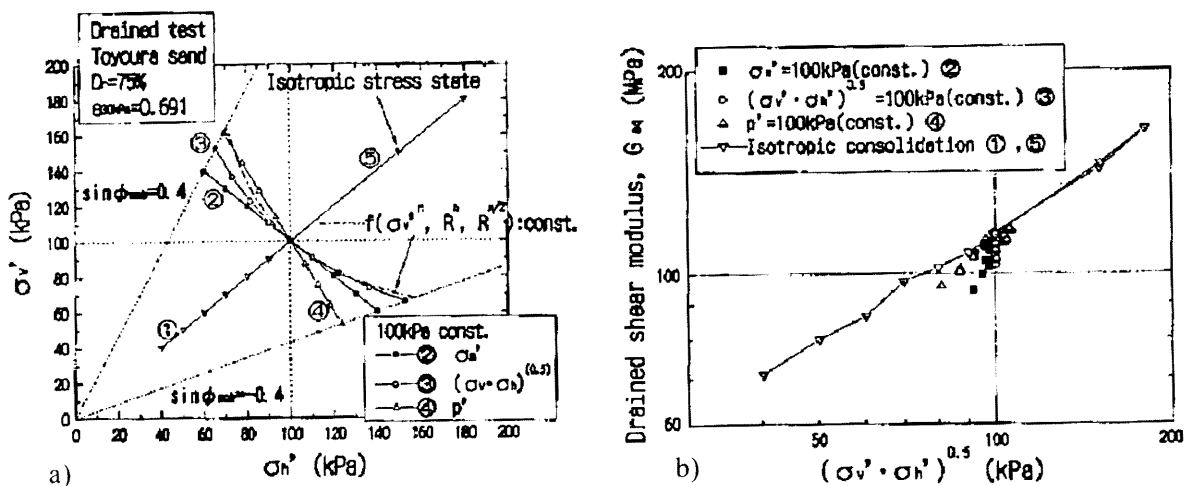


図4.2.6 a)各種応力経路と、b)応力関数、 $(\sigma'_v \sigma'_h)^{0.5}$ と静的せん断剛性率の関係

4.2.4 凍結試料の微小変形特性に関する研究

動的・静的手法による微小変形特性の比較に関する既往の研究、および乾燥豊浦砂による予備実験の結果については、3.6を参照されたい。ここでは、等方圧密過程の静的ヤング率 E_s について、凍結採取試料とその再構成試料（利根川砂、名取川砂）を用いて計測した飯島(2002)の結果を示す。図4.2.5に示すように、有効鉛直応力 σ_v' の増加（等方圧密）とともに E_s も増加する傾向が認められる。利根川砂試料（沖積層）では、凍結試料と再構成試料の E_s は同レベルの結果となっているが、名取川砂（洪積層）では凍結試料の方が高い E_s となっている。この傾向については、本研究の実験結果と共に、後に考察を加える。

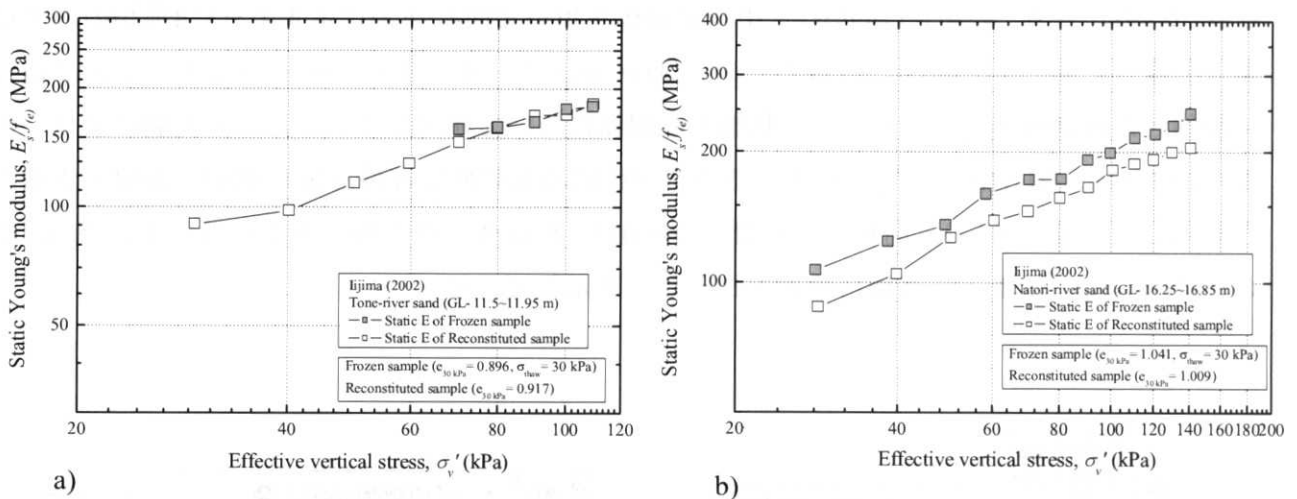


図 4.2.5 a) 利根川砂と b) 名取川砂の凍結試料と再構成試料の静的ヤング率 E_s の比較
(飯島(2002)に加筆)

なお、微小変形特性と試料の乱れを関連付ける研究は、第5章で述べる液状化強度との関連性も含めて、これまでに多くの報告がある。例えば、Tokimatsu & Hosaka (1986)は、試料の乱れの影響は、原位置PS検層と室内微小ひずみ試験との比較によって把握できると報告している。一方、後藤&田地 (1999)は、沖積凍結試料と再構成試料、および原位置のS波速度 V_s を比較しているが、 V_s は液状化強度と比べて試料の変化に対してそれほど敏感に変わらず、年代効果の薄い地盤に対しては乱れの影響を明確に表さないこともあると指摘している。

4.2.5 応力履歴と微小変形特性に関する研究

原地盤の有する年代効果の影響を反映した液状化強度特性を室内土質試験で求めるために、試料に予め応力履歴を与える手法が用いられている。また、年代効果の付与を目的とした応力履歴を与えることで、大きな体積変化を生じることなく供試体の液状化強度は増加することが知られている (Seed, 1979)。したがって、応力履歴による試料の剛性の変化を定量的に求めるため、応力履歴と微小変形特性の関係を検討した研究は比較的多い。

Tokimatsu et al. (1986)は、空中落下法で作成した新潟砂供試体に、約 10,000 回の繰返し载荷を与え、大きな体積変化を与えることなく供試体の微小変形特性が上昇することを確認している。また、履歴後の微小変形特性 (せん断ひずみ 0.001 %程度の微小载荷より得られたせん断剛性率 G_r) が任意の値となるよう、繰返し载荷時の軸ひずみ振幅を 0.08~ 0.2 %の範囲で変化させて実験を実施した (図 4.2.6)。

一方、Teachavorasinskun et al. (1994)は、豊浦砂と Ticino sand を用いて 100,000 回以上の繰返し载荷を、軸ひずみ約 0.1 %で実施した。その結果、図 4.2.7 に示すように、繰返しに伴う体積変化は比較的小さく、かつ有意な微小変形特性 (軸ひずみ 0.001 %程度の微小繰返し载荷より得られたヤング率) の変化は認められなかった (液状化強度は増加している)。

また、Koseki & Ohta (2001)は、豊浦砂とベントナイトをそれぞれ 95 %、5 %に配合した供試体について、過圧密比 OCR や圧密時間、およびセル温度を変化させた供試体の応力履歴前後の微小変形特性 (軸ひずみ 0.0015 %程度の微小繰返し载荷より得られたヤング率) を計測した。その結果、図 4.2.7 に示すように、過圧密比が 1 もしくは 2 の試料では、履歴前後の微小変形特性に変化は認められなかったが、過圧密比 4 の試料および 60 °C で 5 日間圧密させた試料では、応力履歴により微小変形特性の増加が認められた。また、60°C で 5 日間圧密させた試料について、応力履歴により微小変形特性の応力依存性を示す係数 m の値が若干低下したことを確認しているが、これはセメンテーションの発達を示唆していると報告している。

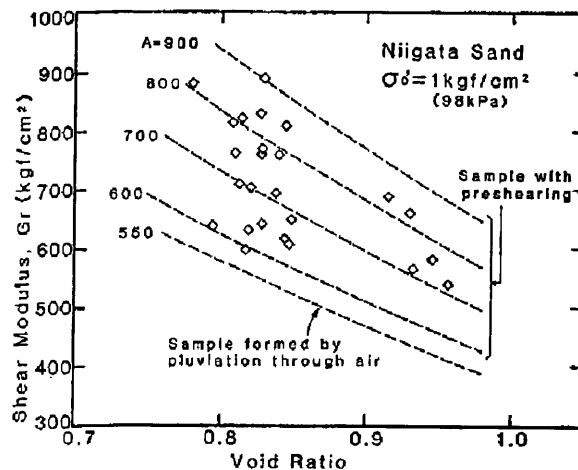
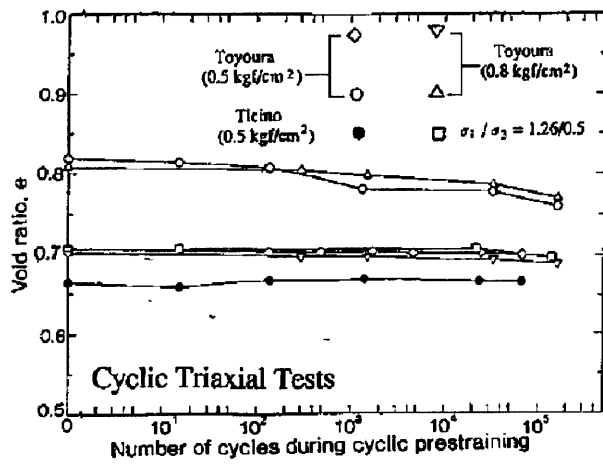
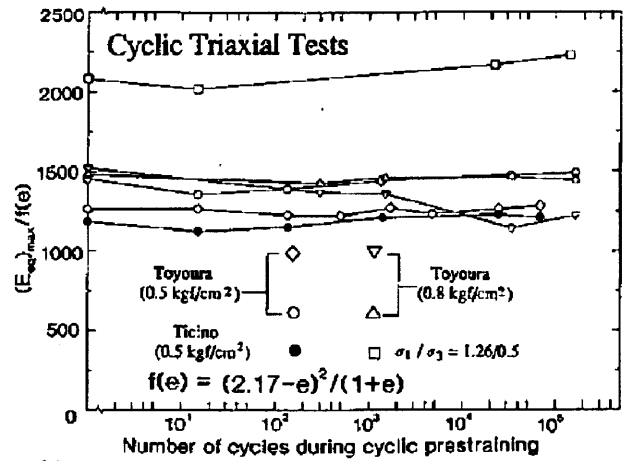


図4.2.6 繰返し载荷履歴を受けた新潟砂再構成試料のせん断剛性率 (Tokimatsu et al, 1986)



a)



b)

図4.2.7 繰返し载荷履歴を受けた豊浦砂とTicino sandの a) 体積変化と b) ヤング率 (Teachavorasinskun et al, 1994)

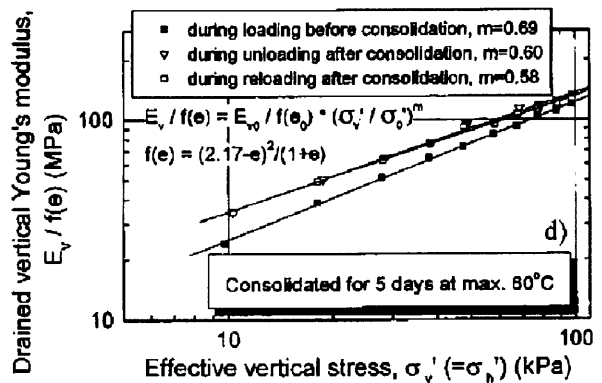
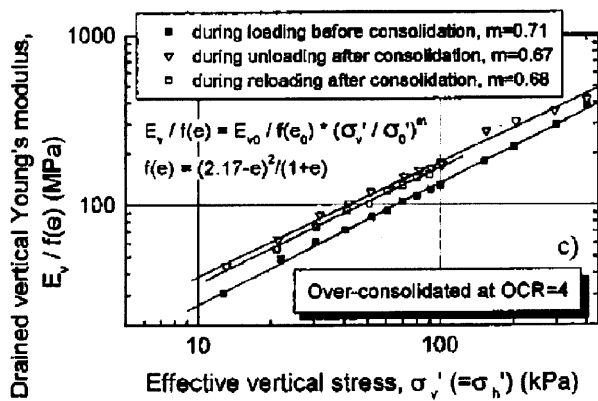
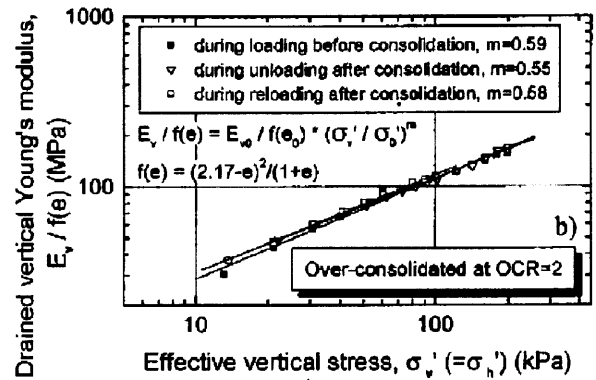
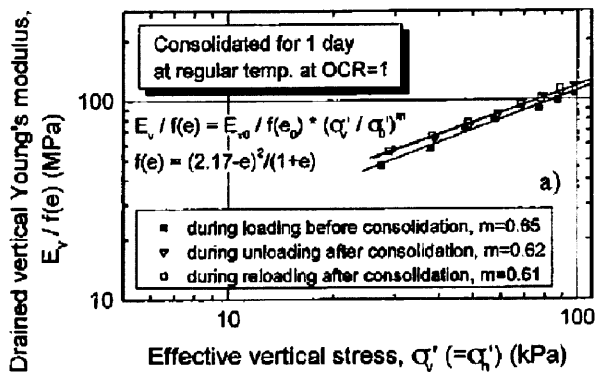


図4.2.8 ベントナイトを混合した豊浦砂のヤング率 (Koseki & Ohta, 2001)

a) OCR= 1, b) OCR= 2, c) OCR= 4, d) OCR=1 (5days, 60 °C)

4.3 凍結採取試料の融解時体積ひずみ

原位置より採取された凍結試料において、異なる融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ における供試体融解時の体積変化時刻歴を計測した。

本研究では、2.8 で述べたように、供試体を冷凍室から出してから計測を開始するまでの間（約 20 分）の体積変化は得られていない。しかし、供試体の初期体積は冷凍庫の中で計測しているため、ここでは最終体積変化量からの逆算により、融解時のひずみの時刻歴を整理した。

表 4.3.1 に融解時の体積ひずみ $\varepsilon_{vol(thaw)}$ の計測結果を示す。また、図 4.3.1~4.3.8 に代表的な供試体の融解時の鉛直ひずみ ε_v 、および側方ひずみ ε_h の時刻歴を示す。

融解ひずみの経時変化図より、個体差はあるが融解を開始してから約 6 時間程度で体積変化は収束する傾向がある。また、 $\sigma_{c(thaw)}$ の差にかかわらず、融解開始から 30 分から 1 時間後に、ほとんどの試料において ε_h や一部の ε_v に収縮のピークが生じていることが確認された。これは、融解開始直後僅かな時間で、最終的な融解ひずみの大部分が生じていることを意味しており、0℃を境に体積が大きく変化する氷の特性（図 4.3.9）を表しているといえる。また、このような現象は、本研究と同様の手法で凍結試料の融解時体積ひずみを計測した望月(2001)、飯島(2000, 2002)による実験でも確認されている。

融解過程においてひずみ収縮のピークが生じる原因としては、温度の変化に伴う間隙水の密度の変化が考えられる。水は、摂氏 0℃付近では、温度が低下すると密度も低下（体積膨張）し、温度が上昇すると密度も上昇（体積収縮）する。しかし、更に温度が上昇すると水の密度は再度低下し、最終的には気体に変化することが知られている。図 4.2.9 に示すように、この温度変化に伴う水の密度の変相点は約 4℃であることから、融解過程における試料内部の温度が 4℃に達した時点で、供試体の体積が収縮から膨張に変化したものと考えられる。一部の利根川砂試料では、融解時に供試体の表面温度を計測している。図 4.2.1 および図 4.2.2 に示すように、融解ひずみの収縮のピークと供試体表面温度が 4℃の時間は、概ね重なっている。

また、側方ひずみ ε_h は、2.8 に示したように供試体の異なる高さ（上・中・下部）において計測したが、 ε_h の収縮ピークは供試体上部の方が中・下部よりも若干早いタイミングで生じている。本研究では、供試体の融解は室温にて行われており、供試体の上部と下部との温度差はほとんど無視できると考えられることから、この原因は明確ではない。供試体の自重に起因する応力分布の違いが融解ひずみに現れたとも考えられるが、供試体の高さは約 10 cm であるため、その影響はかなり小さいといえる。しかし、最終的な ε_h の値については、計測位置の違いによる有意な傾向は認められなかった。

江戸川砂 A 試料は他の試料と比較して、非常に大きな融解時の体積ひずみ $\varepsilon_{vol(thaw)}$ が生じている。図 4.3.3 に示すひずみの時刻歴（ $\sigma_{c(thaw)} = 60$ kPa）では、 ε_h の計測が途中でレンジオーバーとなり、最終的には $\varepsilon_{vol(thaw)} = 12\%$ 程度になる。その他の試料では融解終了まで計測されており、

各試料の融解後の最終的な $\varepsilon_{vol(thaw)}$ は同程度の値であった。4.2にて述べたように、融解時の体積収縮量と凍結時体積膨張量について系統的にまとめた Yoshimi & Goto (1996)は、両者の関係は非常に良いことを示している。また、Goto (1993)は細粒分含有率が高いほど凍結時の膨張も大きくなることを実験的に示していることから、細粒分を約60%混入する江戸川砂A試料は、地盤凍結時の体積膨張量が他の試料よりも格段に大きかったため、融解収縮量も他の試料より大きくなったものと考えられる。

図4.3.10～4.3.13に各試料の融解ひずみと $\sigma_c(thaw)$ の関係を示す。利根川砂、江戸川砂A, B, C試料ともに、 $\sigma_c(thaw) = 98$ kPaの方が、30 kPaの場合よりも $\varepsilon_{vol(thaw)}$ は大きくなる傾向がある。融解終了後、各試料の原位置有効上載圧まで等方圧密したときの体積変化量 $\Delta\varepsilon_{vol}$ を加筆したものを図4.3.14に示す。なお、江戸川砂C試料以外では、 $\sigma_c(thaw)$ の高い方の値は原位置有効上載圧とほぼ等しいことから、圧密の手順は省かれていることに留意されたい。これらの結果より、 $\sigma_c(thaw)$ の違いにより $\varepsilon_{vol(thaw)}$ は異なっても、等方圧密によって、その差は小さくなる傾向が認められる（江戸川砂C試料では一部過大な圧密時体積変化が生じている）。しかし、 $\sigma_c(thaw)$ の違いによる $\varepsilon_{vol(thaw)}$ の差は、供試体が経験する塑性ひずみ履歴に影響し、試料が本来有する土粒子の構造に影響を及ぼす可能性が考えられる。このような $\sigma_c(thaw)$ の違いが微小変形特性や液状化強度に及ぼす影響については後述する。

参考までに、本研究と同じ地点・深度で採取された凍結試料の融解時のひずみを計測した既往の研究によると、利根川砂（飯島(2000, 2002)）と江戸川砂B試料（望月(2001)）の融解時の体積変化は、それぞれ $\varepsilon_{vol(thaw)} = 0.02 \sim 0.37$ %程度、 $\varepsilon_{vol(thaw)} = 0.23 \sim 0.57$ %程度（いずれも融解時拘束圧 $\sigma_c(thaw) = 30$ kPa）であった。これらの値は、本研究の計測値（それぞれ $\varepsilon_{vol(thaw)} = 1.5 \sim 1.7$ %程度、 $\varepsilon_{vol(thaw)} = 1.0 \sim 1.4$ %程度）と比較してかなり小さい。融解時の $\varepsilon_{vol(thaw)}$ は、融解開始後間もなくその大部分が生じることを述べたが、凍結試料の初期寸法計測のタイミングが本研究と飯島(2000, 2002)、望月(2001)とは異なっていた可能性が考えられる（本研究では供試体のセットおよび拘束圧載荷を冷凍室の中で行っており、融解が始まる前に供試体初期寸法を計測している）。

表 4.3.1 融解時のひずみの計測結果

試料名 (採取深度 m)	試料 No.	融解時 拘束圧 $\sigma_c(thaw)$ (kPa)	融解時 軸ひずみ ε_v	融解時 側方ひずみ ε_h	融解時 体積ひずみ $\varepsilon_{vol(thaw)}$	細粒分 含有率 FC (%)	原位置 有効 上載圧 $\sigma_v'(kPa)$
利根川砂 (GL-11.8~12.1)	TxTon-F1	98	0.855	0.787	2.409	1.2	100
	TxTon-F2	98	0.391	0.583	1.549	1.2	100
	TxTon-F3	30	0.474	0.522	1.511	1.2	100
	TxTon-F4	98	0.818	0.835	2.468	1.2	100
	TxTon-F5	98	0.926	0.672	2.253	1.2	100
	TxTon-F6	30	0.642	0.553	1.738	1.2	100
	TxTon-F7	98	0.491	0.792	2.062	1.2	100
	TxTon-F8	30	0.344	0.647	1.629	1.2	100
江戸川砂 A (GL-5.3~5.5)	TxEdo-A-F4	60	2.498	4.778	11.592	62.7	60
	TxEdo-A-F5	10	0.633	2.946	6.401	62.7	60
江戸川砂 B (GL-10.3~11.0)	TxEdo-B-F1	98	0.627	0.568	1.754	3.0	100
	TxEdo-B-F2	30	0.362	0.321	1.002	3.0	100
	TxEdo-B-F3	30	0.433	0.349	1.126	3.0	100
	TxEdo-B-F4	30	0.710	0.349	1.402	3.0	100
	TxEdo-B-F5	98	0.933	0.716	2.347	3.0	100
江戸川砂 C (GL-16.0~17.6)	TxEdo-C-F2	30	0.144	0.165	0.473	2.9	160
	TxEdo-C-F3	98	0.921	0.638	2.181	2.9	160
	TxEdo-C-F4	98	0.900	0.472	1.833	2.9	160
	TxEdo-C-F5	30	0.297	0.207	0.709	2.9	160
	TxEdo-C-F6	98	0.481	0.542	1.557	2.9	160
	TxEdo-C-F9	98	0.486	0.744	1.962	9.4	160

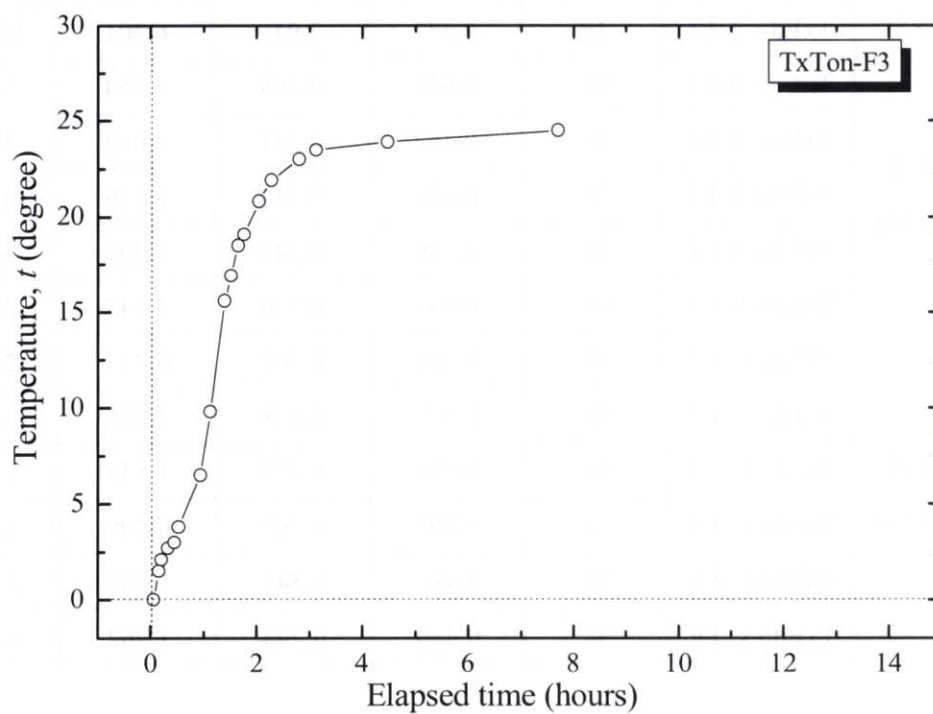
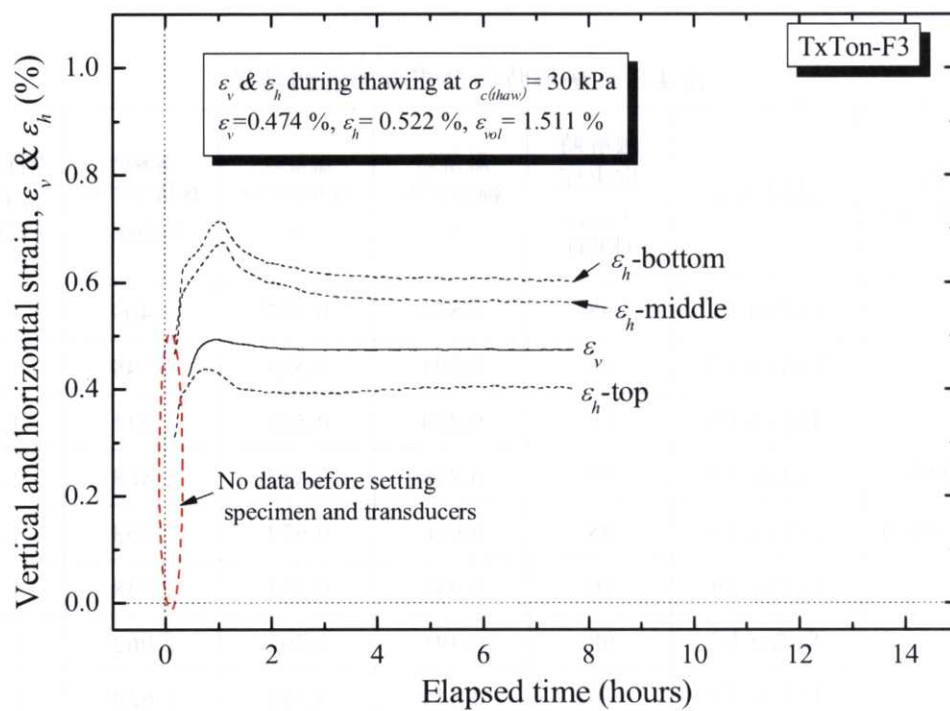


図 4.3.1 利根川砂試料 (TxTon-F3) の a) 融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) と b) 供試体表面温度

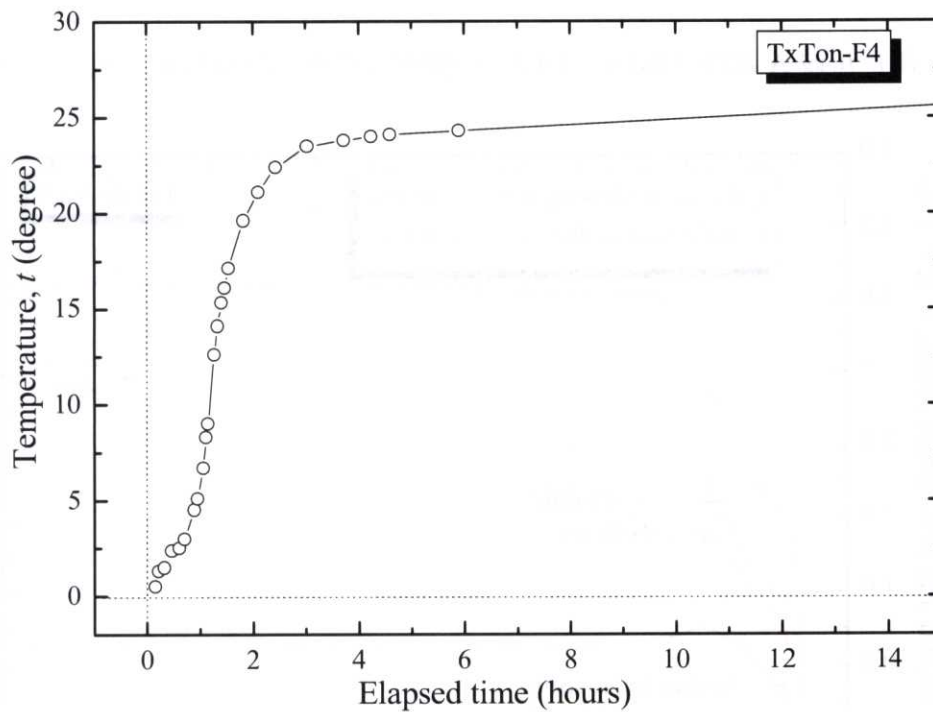
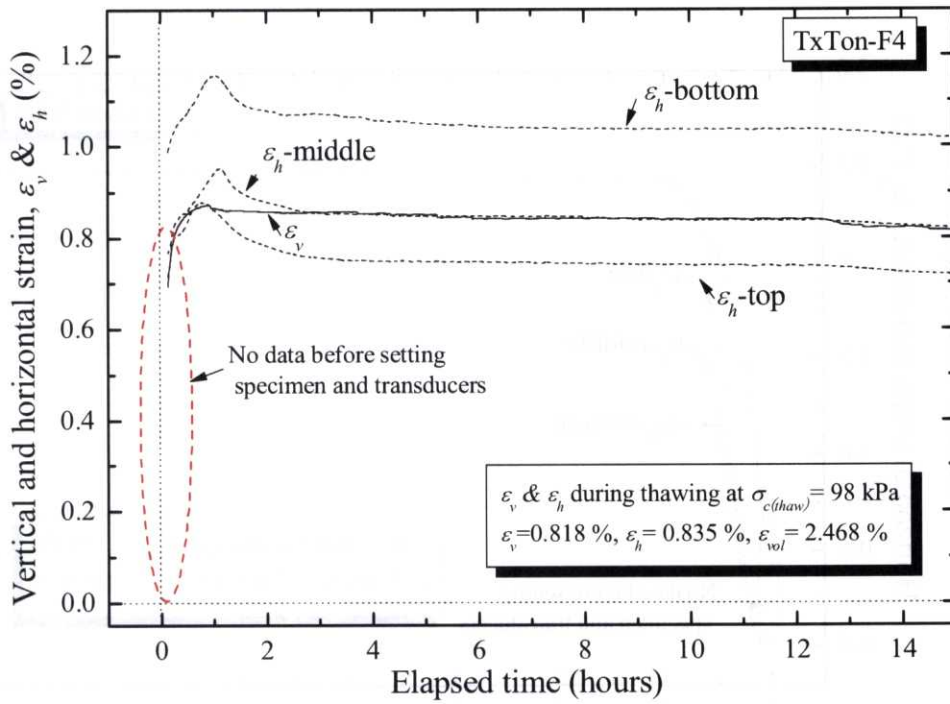


図 4.3.2 利根川砂試料 (TxTon-F4) の a) 融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa) と b) 供試体表面温度

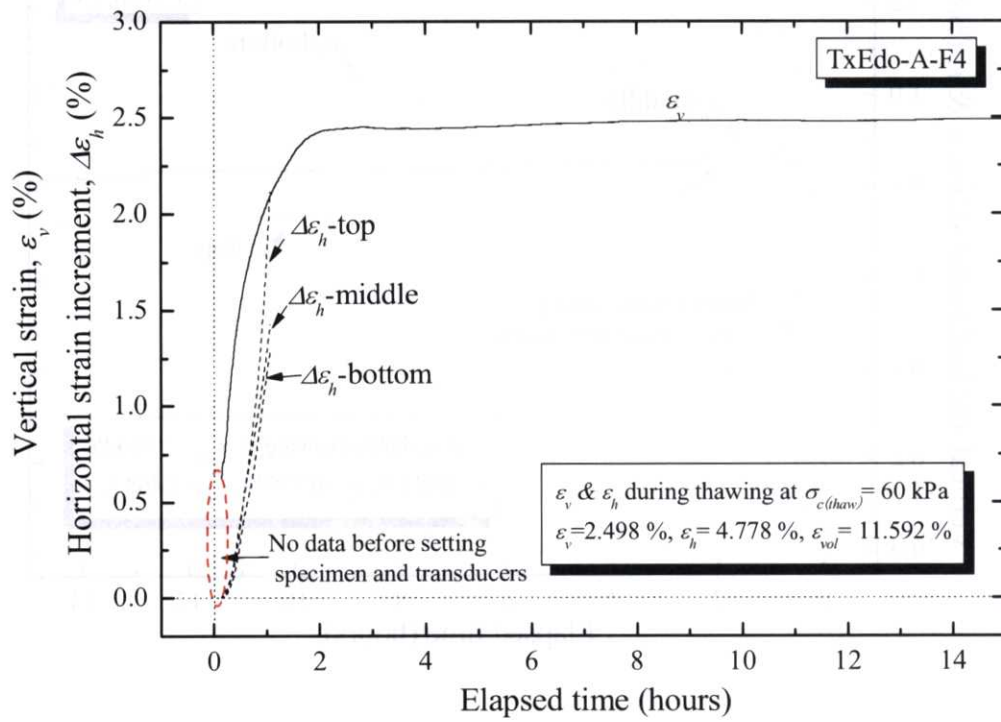


図 4.3.3 江戸川砂 A 試料 (TxEdo-A-F4) の融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 60$ kPa)

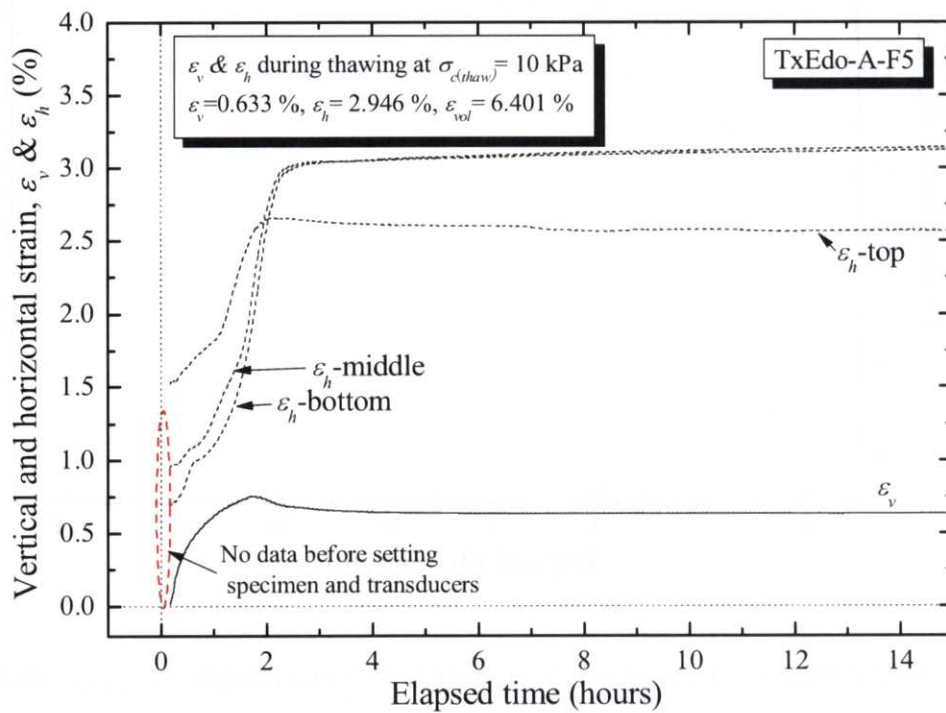


図 4.3.4 江戸川砂 A 試料 (TxEdo-A-F5) の融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 10$ kPa)

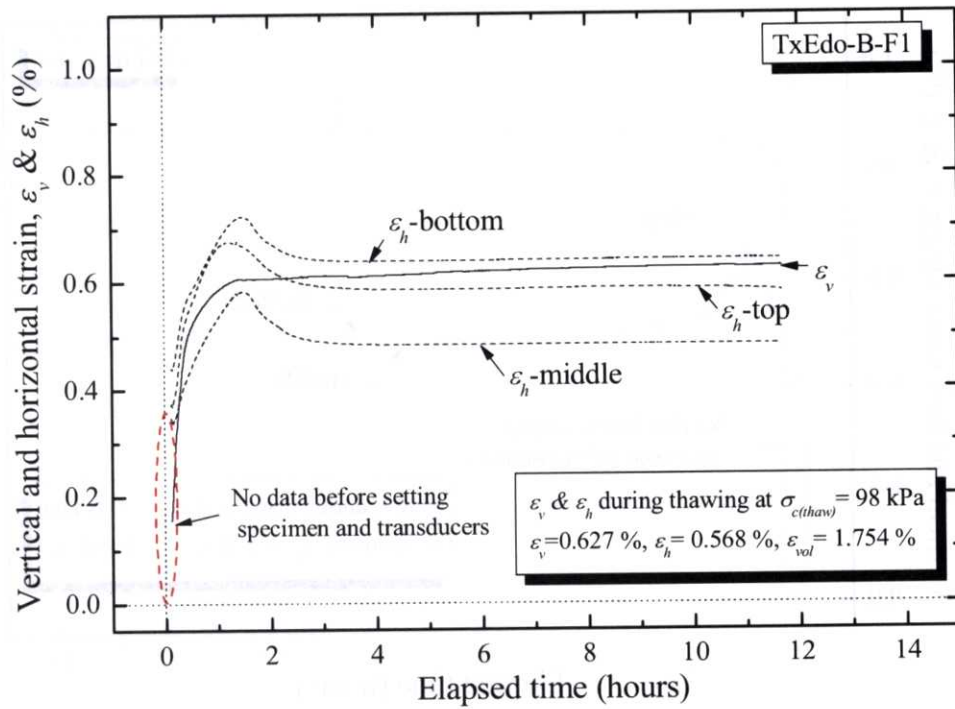


図 4.3.5 江戸川砂 B 試料 (TxEdo-B-F1) の融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa)

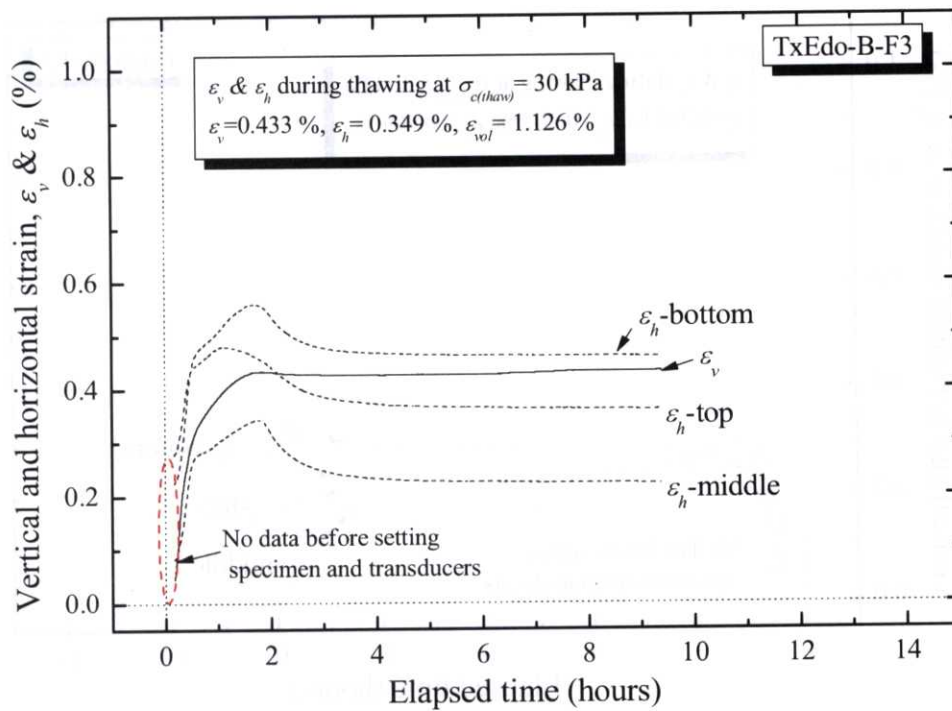


図 4.3.6 江戸川砂 B 試料 (TxEdo-B-F3) の融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa)

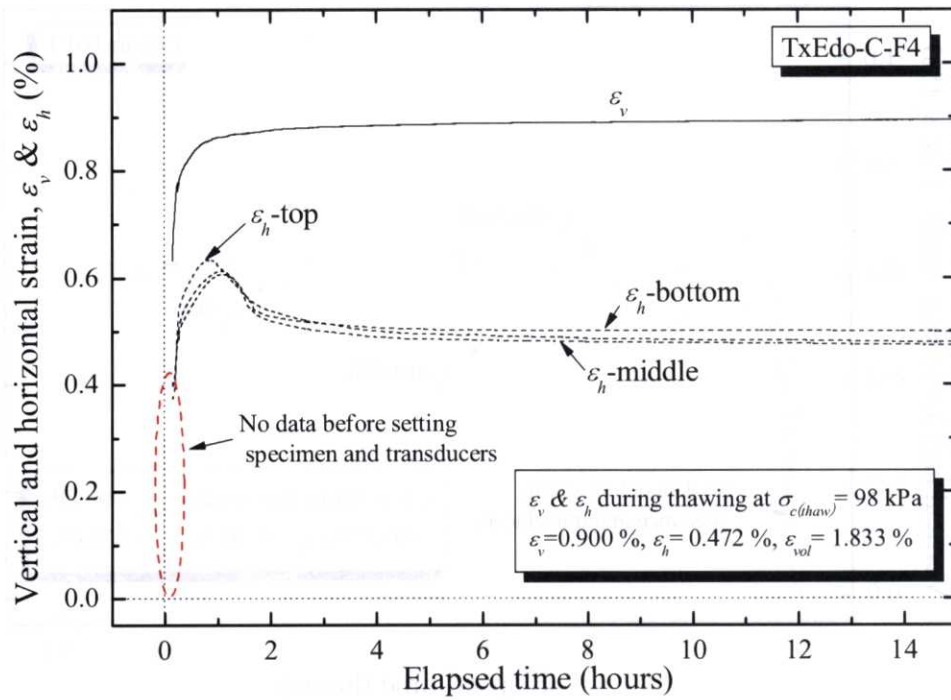


図 4.3.7 江戸川砂 C 試料 (TxEdo-C-F4) の融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 98 \text{ kPa}$)

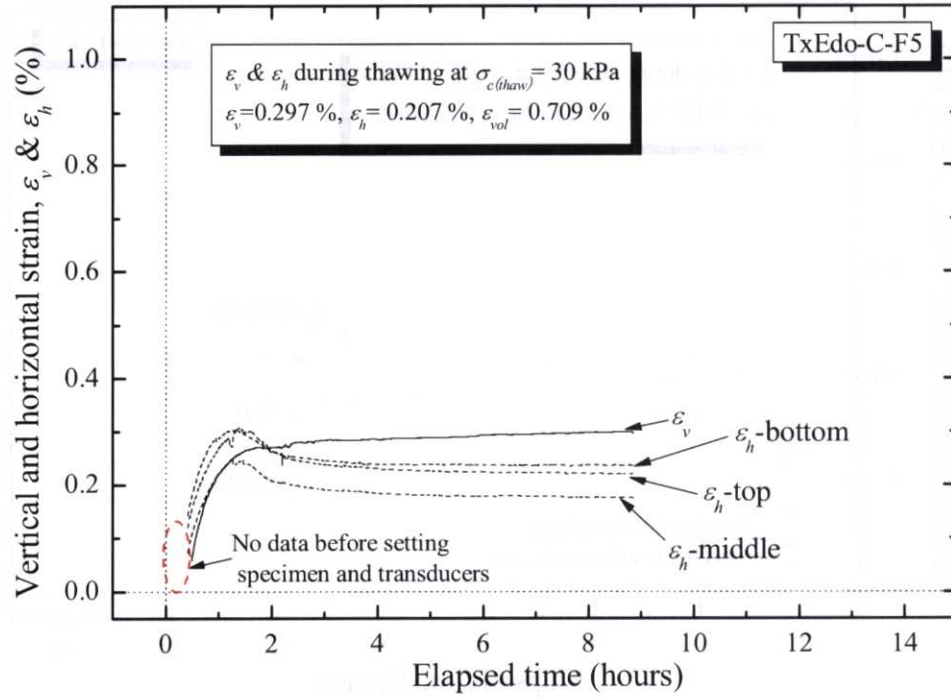


図 4.3.8 江戸川砂 C 試料 (TxEdo-C-F5) の融解ひずみの計測結果 ($\sigma_{c(thaw)} = 30 \text{ kPa}$)

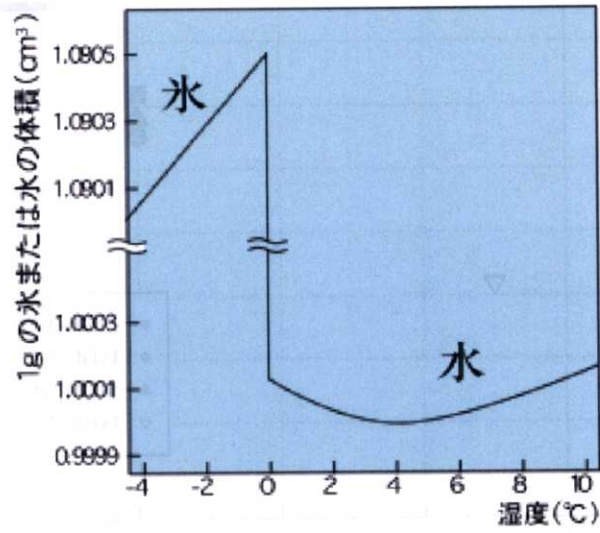


図 4.3.9 水と氷の体積と温度の関係 (新宿氷業株式会社 HP より)

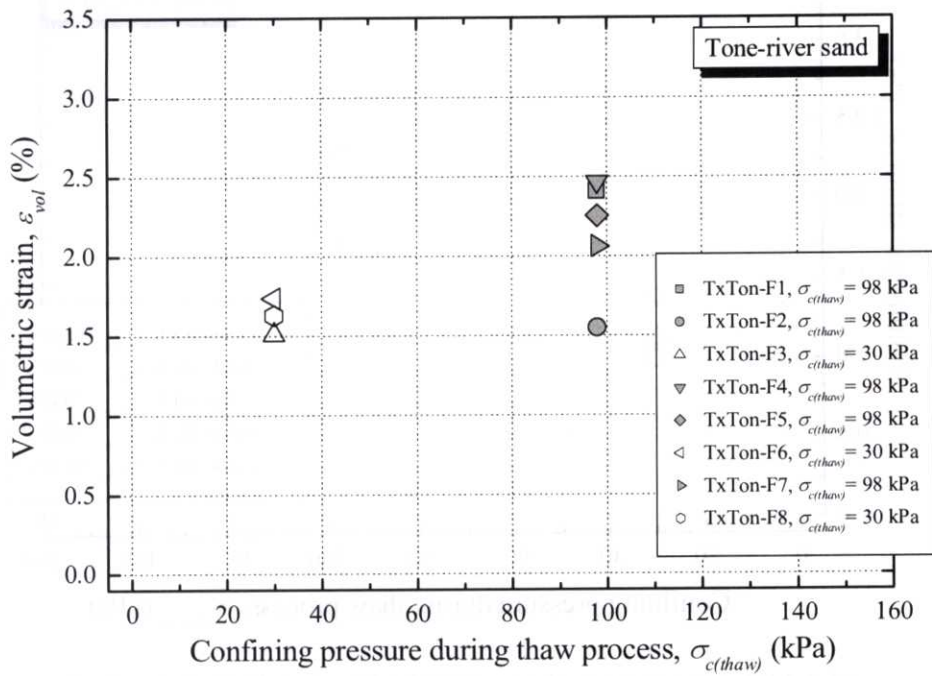


図 4.3.10 利根川砂試料の融解拘束圧と体積ひずみの関係

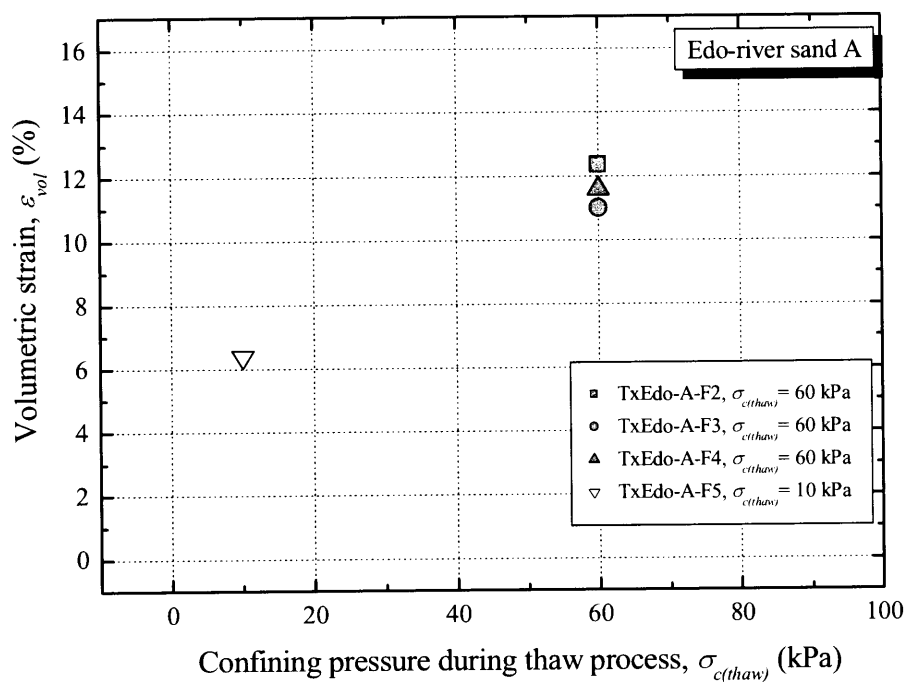


図 4.3.11 江戸川砂 A 試料の融解拘束圧と体積ひずみの関係

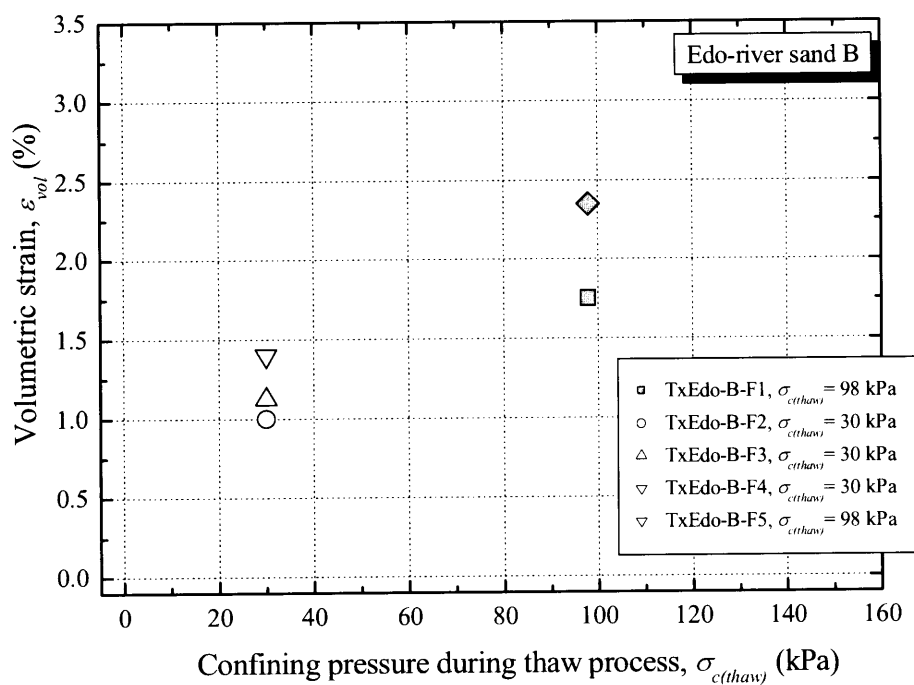


図 4.3.12 江戸川砂 B 試料の融解拘束圧と体積ひずみの関係

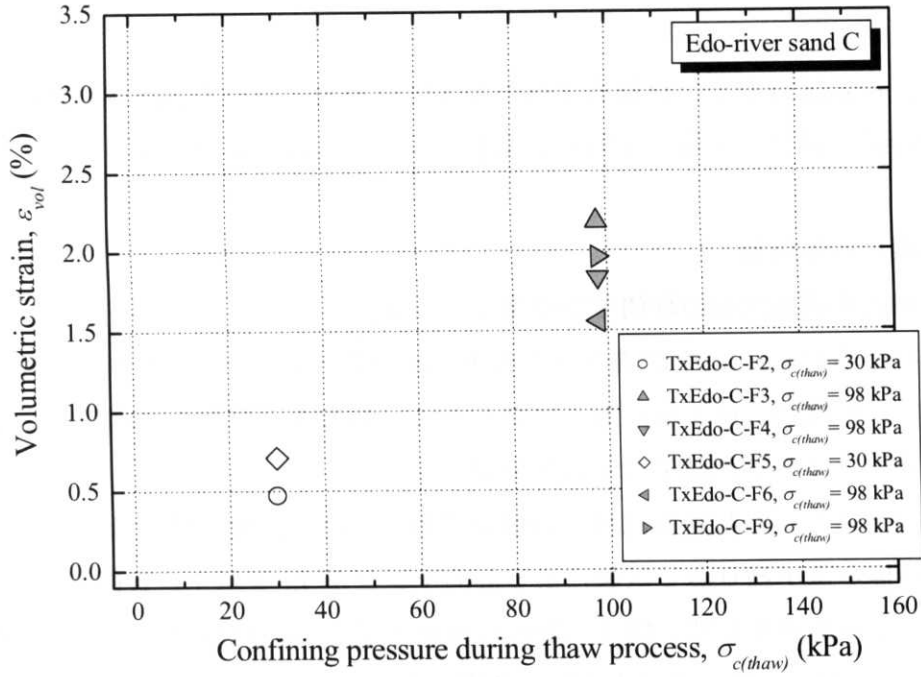


図 4.3.13 江戸川砂 C 試料の融解拘束圧と体積ひずみの関係

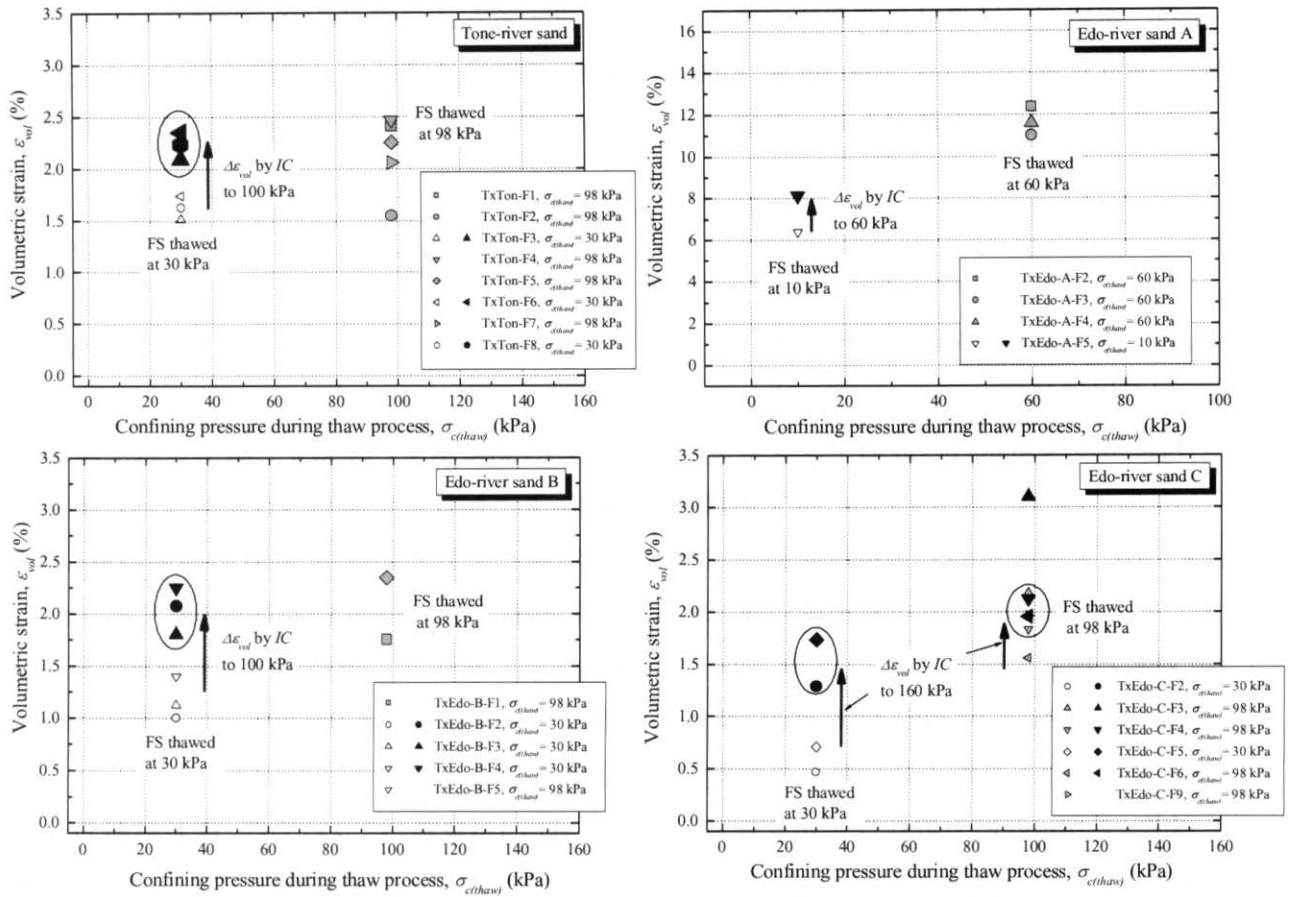


図 4.3.14 融解および等方圧密後の残留体積ひずみ

4.4 等方圧密過程における微小変形特性

ここでは、凍結試料および再構成試料の等方圧密過程において計測された微小変形特性について、その計測手法別（静的・動的）に結果を示し、比較・検討を行う。

4.4.1 静的微小変形特性

(1) 凍結試料と再構成試料の静的ヤング率 E_s の比較

各試料の初期応力を σ'_{c0} 、原位置有効上載圧を最終応力 σ'_{cl} とした等方圧密過程の任意の応力状態において、供試体に微小繰り返し载荷を与え、静的微小変形を計測した。ここでは、主に *LDT* による局所ひずみ計測結果を用いて概説する。

表 4.4.1, 4.4.2 にそれぞれ凍結試料と再構成試料の詳細な試験結果を示す。また、図 4.4.1~4.4.4 に、各試料の排水微小繰り返し試験による静的ヤング率 E_s を示す。各図においては、4.2.3 で述べたヤング率の応力依存性に関する既往の研究を基に、鉛直有効応力 σ'_v との関係を示している。再構成試料では、一部の供試体を除き初期拘束圧 $\sigma'_{c0} = 30$ kPa より所定の応力まで圧密を実施しているが、凍結試料については、 $\sigma'_{c0} =$ 融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ であり、 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いにより圧密開始時の拘束圧が異なっている。

なお、本研究では供試体間隙比の差の影響を考慮するため、下式の Hardin & Richart(1963)の間隙比関数を用いている。Hardin & Richart (1963) の間隙比関数は、豊浦砂をはじめとする多くの砂質土において実績があり、本研究でもこの間隙比関数をすべての試料に対し適用する。

$$f(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e) \quad [4.1]$$

以下、各試料に実験結果を述べる。

a) 利根川砂試料

利根川砂凍結試料の静的ヤング率 $E_s/f(e)$ を図 4.4.1 a) に示す。30 kPa で融解された凍結試料の $E_s/f(e)$ の値は、図 4.4.1 b) に示す再構成試料の結果と比較してばらつきが少ない。また、図 4.4.1 b) には凍結試料と再構成試料の $E_s/f(e)$ の平均値も記しているが、両者の関係は概ね同等、もしくは凍結試料の方が若干高い値（最終等方圧密応力 $\sigma'_{cl} = 100$ kPa での比較では、 $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa では 6 %程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa では 13 %程度）を示す。凍結試料の融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違い(30 kPa と 98 kPa)が $E_s/f(e)$ に及ぼす影響については、 $\sigma'_{cl} = 100$ kPa での比較では $\sigma_{c(thaw)}$ の高い試料の方が若干高い値（平均約 7 %）を示す。

また、 $E_s/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m (3章, 式[3.15]参照) については、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa)、再構成試料それぞれ $m = 0.58, 0.56$ 程度（比較的ばらつきの少ないデータ ($R^2 > 0.95$) の平均) を示し、両者の差はほとんど認められない。

b) 江戸川砂 A 試料

江戸川砂 A 試料の凍結試料の静的ヤング率 $E_s/f(e)$ を図 4.4.2 に示す。なお、江戸川砂 A 試料では、再構成試料での実験を実施していない。凍結試料の融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違い (10 kPa と 60 kPa) が $E_s/f(e)$ に及ぼす影響については、最終等方圧密応力 $\sigma'_{cl} = 60$ kPa での比較では高融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 60$ kPa) の方が低融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 10$ kPa) よりも平均約 13 % 高い値を示す。

また、 $E_s/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m については、一試料のみの計測値であるが、利根川砂試料と同程度の $m = 0.56$ となっている。

c) 江戸川砂 B 試料

江戸川砂 B 試料 (図 4.4.3) では、利根川砂試料と異なり、凍結試料の方が再構成試料よりも、静的ヤング率 $E_s/f(e)$ は明らかに大きな値を示している。最終等方圧密応力 $\sigma'_{cf} = 100$ kPa での比較では、 $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa では 52 %程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa では 62 %程度、凍結試料の方が大きくなる。また、凍結試料について、融解拘束圧 σ_{thaw} の違い (30 kPa と 98 kPa) による $E_s/f(e)$ の違いは、利根川砂と同様、 $\sigma_{c(thaw)}$ の高い方が若干高い $E_s/f(e)$ の値を示す結果となった。試験数が少ないため一概には言えないが、 $\sigma'_{cl} = 100$ kPa での比較では高融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa) の方が低融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) よりも平均約 7 % 高い値となっている。低融解拘束圧試料と再構成試料との比較では、低い応力状態では両者の $E_s/f(e)$ の差は小さいが、高い応力レベルになるほど凍結試料の方が高い $E_s/f(e)$ を示す。この傾向は、 $E_s/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m にも表れており、再構成試料では $m = 0.62$ 程度 ($R^2 > 0.95$ のデータの平均) であるのに対し、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) では $m = 0.80$ 程度とかなり大きな値になっている。参考までに、凍結試料の静的非排水ヤング率 $E_{su}/f(e)$ に対応する m は 0.55 程度を示しており、再構成試料の m よりも小さな値を示す。

d) 江戸川砂 C 試料

江戸川砂 C 試料 (図 4.4.4) では、 $E_s/f(e)$ は凍結試料の方が再構成試料よりも大きな値を示しており、最終等方圧密応力 $\sigma'_{cl} = 160$ kPa での比較では、 $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa では 77 %程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa では 63 %程度、凍結試料の方が大きくなる。凍結試料の融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違い (30 kPa と 98 kPa) による $E_s/f(e)$ の違いは、他の試料と異なり、 $\sigma_{c(thaw)}$ の低い試料の方が若干高い $E_s/f(e)$ の値 (約 8 %) を示す。しかし、これは低融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) の一部 (TxEdo-C-F5) が極端に大きな値を示したためであり、この値を除いた場合は $\sigma_{c(thaw)}$ の差による $E_s/f(e)$ の差はほとんどないといえる。また、低融解拘束圧試料と再構成試料との比較では、低い応力状態でも凍結試料の $E_s/f(e)$ は再構成試料よりも高い値となっており、その差は江戸川砂 B 試料よりも大きい。

また、 $E_s/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m については、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) では $m = 0.60$ 程度、再構成試料 (初期圧密応力 $\sigma_{c0} = 30$ kPa のもの) では $m = 0.63$ 程度 (いずれも $R^2 > 0.95$ のデータの平均) を示し、凍結試料の方が若干低い値を示す。

各試料の $E_s/f(e)$ の比較による明確な相違点は、凍結試料と再構成試料の違いである。利根川砂試料では、両者の $E_s/f(e)$ は概ね同等、もしくは凍結試料の方が若干高い値 (約 6~13%) であったが、江戸川砂 B, C 試料ではその差は広がり、50~80%程度となった。また、江戸川砂 B 試料と C 試料の比較では、後者のほうが差は若干大きい。これは、各試料の堆積年代によって説明できる。利根川砂試料は沖積層、江戸川砂 B, C 試料は洪積層から採取されたものであるため、各試料の凍結試料と完全に乱された再構成試料との比較では、より堆積年代が長く、セメンテーションや土粒子構造の安定化等の年代効果が強く発揮されていると考えられる江戸川砂 B, C 凍結試料の方が、その再構成試料よりも大きな $E_s/f(e)$ が得られたものと考えられる。また、この結果のように、密度が同程度であるにもかかわらず、凍結試料と再構成試料の $E_s/f(e)$ に差が生じたことから、静的ヤング率 E_s は密度 (間隙比) のみに依存するパラメータではないことがいえる。

今回のように、凍結試料とその再構成試料の等方圧密過程における静的ヤング率 E_s を計測した例として、4.2 で述べた飯島(2002)の研究がある。飯島の用いた試料は、洪積砂層 (名取川砂、採取深度 GL-16.25 m) および沖積砂層 (利根川砂、採取深度 11.5 m) である。図 4.2.5 に示したように、洪積層である名取川砂では凍結試料と再構成試料に明瞭な差があるのに対し、沖積層である利根川砂の結果は、両者に大きな差は生じていない。この傾向は本研究の結果と非常によく似ているといえる。なお、飯島(2002)の利根川砂試料は本研究とほぼ同じ深度で採取されたものであるが、本研究の結果はこれよりやや低い E_s が得られる傾向にある。これは、飯島(2002)と本研究の初期間隙比に差が生じているため、結果として両者に差が出たものと考えられる。ちなみに、間隙比関数を考慮しない場合は両者とも同等の E_s が得られていることから、供試体初期体積計測時の誤差が影響したものと考えられる。

融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いによる $E_s/f(e)$ の差は、利根川砂試料および江戸川砂 A, B 試料では高融解拘束圧試料の方が高い値 (約 7~13%) を示した。これは、 $\sigma_{c(thaw)}$ が低下したことによる凍結試料の乱れを表している可能性がある。特に江戸川砂 A 試料でその傾向が強く表れたが、これは他の試料と比較して融解がより低い拘束圧 ($\sigma_{c(thaw)} = 10$ kPa) で行われたため、試料の乱れの影響が顕著であった可能性が考えられる。また、江戸川砂 C 試料では、ばらついたデータを除くと両者の差はほとんどない。

$E_s/f(e)$ の応力状態依存性 m について、ばらつきの少ないデータ ($R^2 > 0.95$) を用いて凍結試料と再構成試料を比較すると、利根川砂ではほぼ同程度、江戸川砂 B, C 試料では若干凍結試料の方が低い値を示す (江戸川砂 B 凍結試料では非排水ヤング率 E_{su} の m を考慮した場合)。

表 4.4.1 凍結試料の静的ヤング率計測結果

試料名 (最終圧密圧力) σ'_{cl}	試料 No.	$\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	Void ratio at σ'_{cl}	$E_s/f(e)$ at σ'_{cl} (MPa)	$G_s^*/f(e)$ at σ'_{cl} (MPa)	$m (R^2)$	E_{su}/E_s	$E_{s(GS)}/E_{s(LDT)}$
利根川砂 (100 kPa)	TxTon-F1	98	0.720	152.7	72.4	-	1.02	0.84
	TxTon-F3	30	0.715	133.7	63.4	0.509 (0.998)	1.14	0.90
	TxTon-F4	98	0.734	148.5	70.4	-	1.14	0.82
	TxTon-F5	98	0.764	157.8	74.8	-	1.10	-
	TxTon-F6	30	0.708	147.3	69.9	0.647 (0.994)	1.25	0.79
	TxTon-F7	98	0.725	138.5	65.7	-	1.15	0.82
	TxTon-F8	30	0.729	137.3	65.1	0.588 (0.983)	1.27	0.73
江戸川砂 A (60 kPa)	TxEdo-A-F2	60	1.167	101.7	43.5	-	1.26	0.99
	TxEdo-A-F3	60	1.157	108.4	46.3	-	1.18	1.03
	TxEdo-A-F4	60	1.184	123.9	52.9	-	1.25	0.93
	TxEdo-A-F5	10	1.189	98.1	41.9	0.559 (0.952)	1.27	0.94
江戸川砂 B (100 kPa)	TxEdo-B-F1	98	0.838	291.3	138.1	-	1.14	0.77
	TxEdo-B-F3	30	0.811	249.9	118.5	0.798 (0.953)	1.44	0.67
	TxEdo-B-F5	98	0.815	241.6	114.6	-	1.15	0.54
江戸川砂 C (160 kPa)	TxEdo-C-F2	30	0.710	333.7	158.2	0.589 (0.976)	1.29	0.65
	TxEdo-C-F3	98	0.696	333.4	158.1	0.605 (0.907)	1.06	0.73
	TxEdo-C-F4	98	0.818	331.0	157.0	0.628 (0.999)	-	-
	TxEdo-C-F5	30	0.834	388.7	184.3	0.662 (0.958)	1.27	-
	TxEdo-C-F6	98	0.773	331.1	157.0	0.959 (0.908)	-	-

表 4.4.2 再構成試料の静的ヤング率計測結果

試料名 (最終圧密圧力) σ'_{cl}	試料 No.	σ_{c0} (kPa)	Void ratio at σ'_{cl}	$E_s/f(e)$ at σ'_{cl} (MPa)	$G_s^*/f(e)$ at σ'_{cl} (MPa)	$m (R^2)$	E_{su}/E_s	$E_{s(GS)}/E_{s(LDT)}$
利根川砂 再構成試料 (100 kPa)	TxTon-R1	30	0.720	131.6	62.4	0.449 (0.944)	1.22	0.84
	TxTon-R2	30	0.763	143.3	67.9	0.573 (0.997)	1.28	0.79
	TxTon-R3	30	0.732	115.0	54.6	0.616 (0.987)	1.27	1.24
	TxTon-R5	30	0.709	115.3	54.7	0.549 (0.995)	1.21	0.82
	TxTon-R6	30	0.692	119.6	56.7	0.554 (0.999)	1.26	1.04
	TxTon-R7	30	0.710	110.4	52.4	-	1.26	0.79
	TxTon-R8	30	0.730	140.6	66.7	0.560 (0.987)	1.30	0.75
	TxTon-R9	40	0.764	141.5	67.1	0.545 (0.997)	-	1.01
	TxTon-R10	30	0.771	150.9	71.6	0.642 (0.989)	1.26	-
	TxTon-R11	40	0.764	147.8	70.1	0.578 (1.000)	-	-
	TxTon-R12	30	0.748	135.1	64.1	0.545 (0.993)	1.28	-
	江戸川砂 B 再構成試料 (100 kPa)	TxEdo-B-R1	30	0.740	164.1	63.7	0.746 (0.995)	-
TxEdo-B-R2		30	0.830	163.6	63.5	0.592 (0.990)	1.07	0.90
TxEdo-B-R3		30	0.805	160.5	62.3	0.579 (1.000)	1.13	0.89
TxEdo-B-R6		30	0.828	169.4	65.8	0.578 (0.979)	1.13	0.79
TxEdo-B-R7		30	0.826	154.4	59.9	0.633 (0.996)	1.12	1.03
TxEdo-B-R8		30	0.844	172.7	67.0	0.619 (0.993)	1.11	-
江戸川砂 C 再構成試料 (160 kPa)	TxEdo-C-R1	30	0.755	200.1	94.9	0.663 (0.976)	1.19	0.85
	TxEdo-C-R2	30	0.746	203.3	96.4	0.679 (0.991)	1.24	0.79
	TxEdo-C-R3	30	0.764	197.8	93.8	0.601 (0.977)	1.21	0.86
	TxEdo-C-R4	30	0.780	204.9	97.2	0.558 (0.998)	-	0.86
	TxEdo-C-R6	60	0.696	209.0	99.1	0.547 (0.996)	-	-
	TxEdo-C-R7	60	0.715	205.9	97.6	0.613 (0.999)	-	-

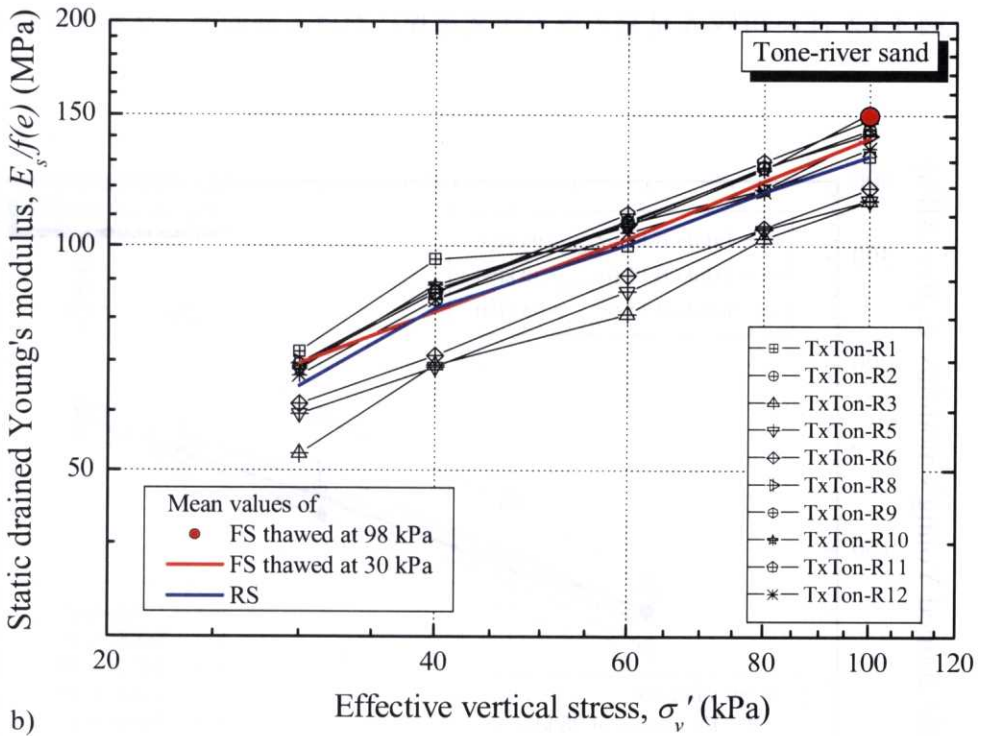
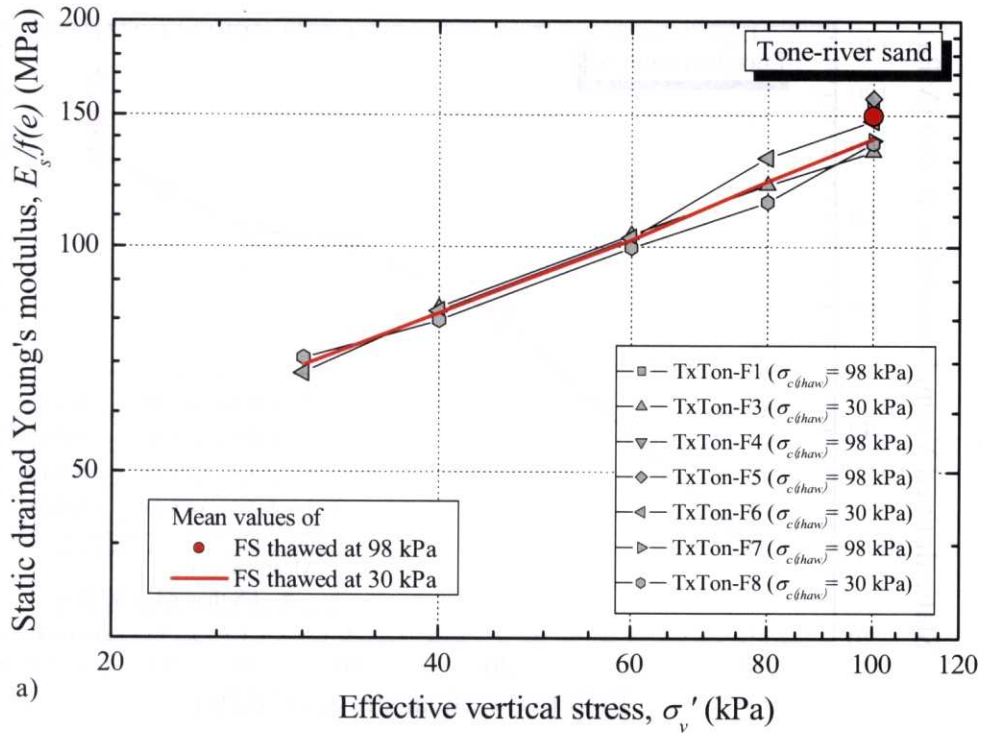


図 4.4.1 利根川砂試料の等方圧密過程における静的ヤング率計測結果
a) 凍結試料, b) 再構成試料

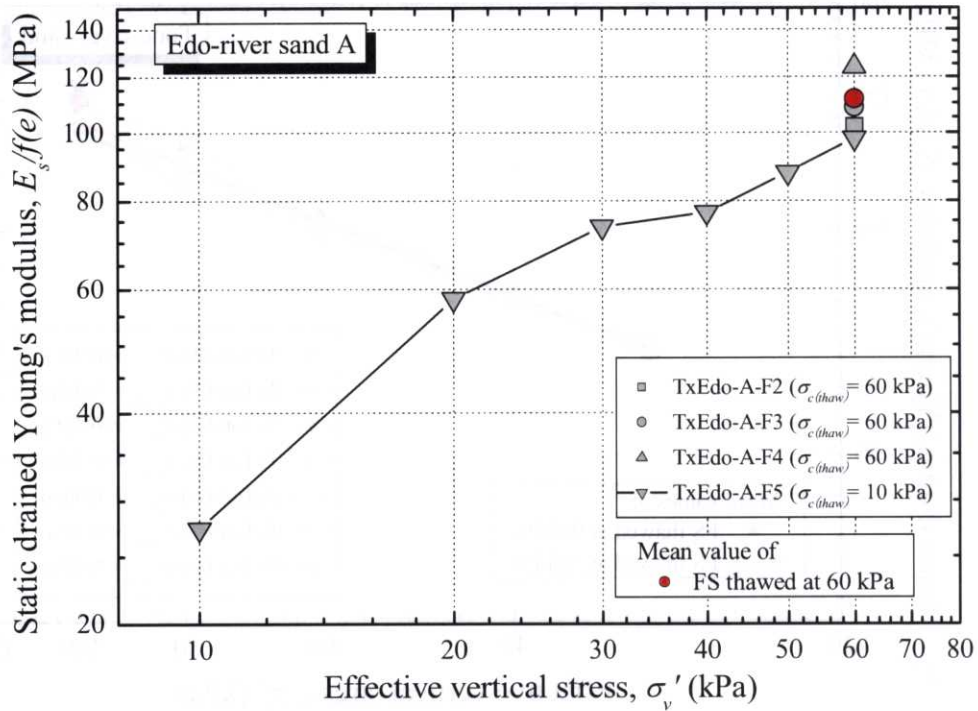


図 4.4.2 江戸川砂 A 試料の等方圧密過程における静的ヤング率計測結果

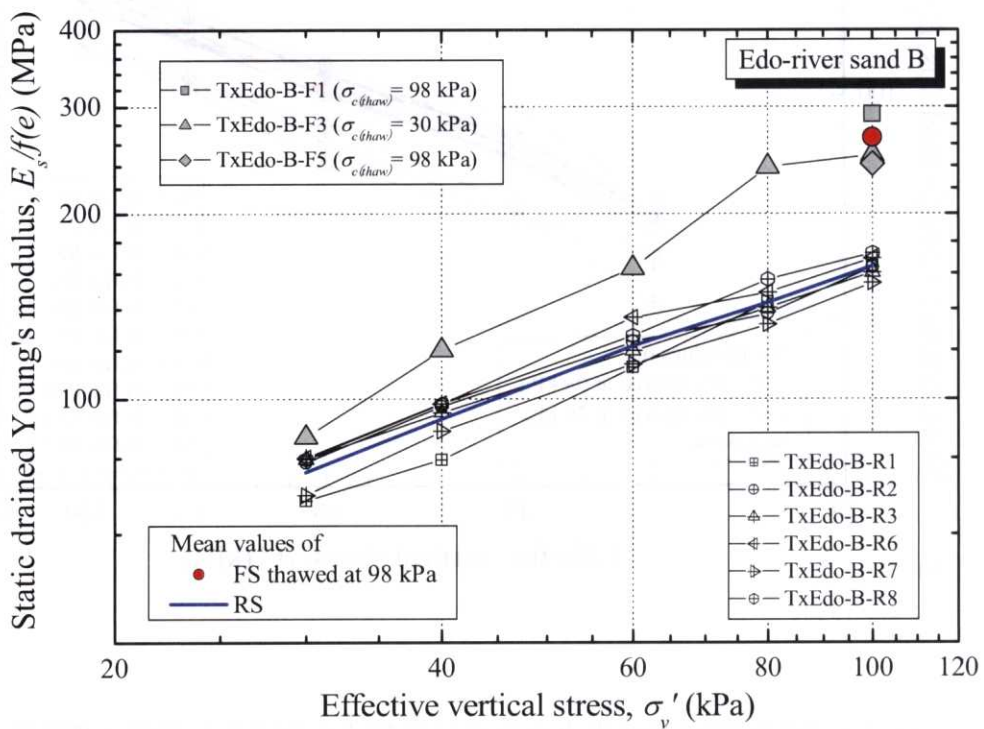


図 4.4.3 江戸川砂 B 試料の等方圧密過程における静的ヤング率計測結果

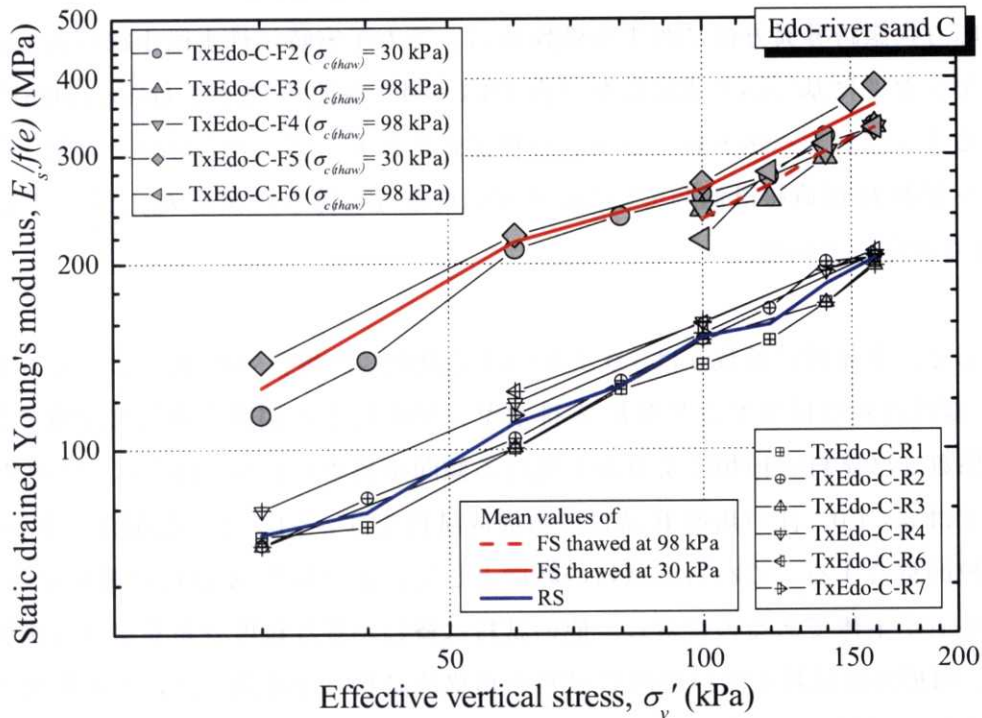


図 4.4.4 江戸川砂 C 試料の等方圧密過程における静的ヤング率計測結果

(2) 非排水条件下における静的ヤング率 E_{su}

(1)では、排水条件下における静的ヤング率 E_s を示したが、本研究では非排水条件においても微小繰返し試験を実施している。第 5 章では、液状化中の微小変形特性を検討していることから、排水条件の異なる状態で計測されたヤング率の比較は非常に重要である。

各試料の等方圧密過程における非排水ヤング E_{su} を排水ヤング率 E_s の平均値と共に図 4.4.5~4.4.8 に示す。また、非排水ヤング率と排水ヤング率の比 (E_{su}/E_s) の平均値を表 4.4.1, 4.4.2 に示す。これらの比較により、全体的に 10~30%程度 非排水ヤング率 E_{su} の方が排水ヤング率 E_s よりも高い値が得られている。

ここでは、上記試験結果を踏まえ、第 3 章の式[3.38]に示す非排水ヤング率 E_{su} と排水ヤング率 E_s の関係から推定される異方性の影響 (係数 $a =$ 鉛直ヤング率 E_v /水平ヤング率 E_h) を検討する。

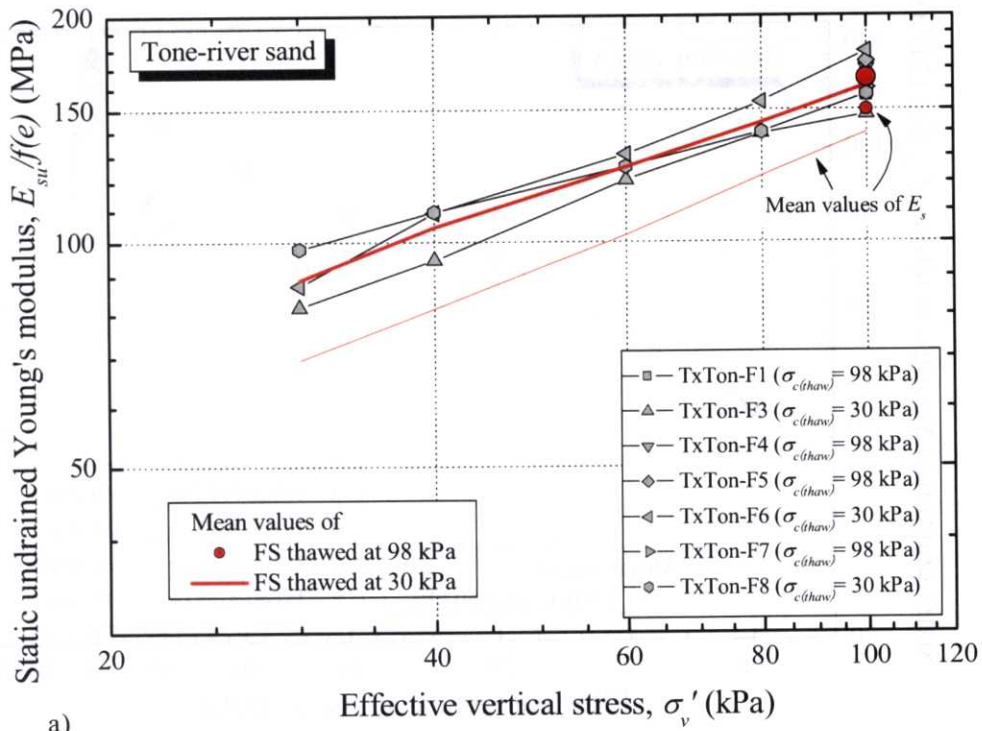
図 4.4.9~4.4.12 は、それぞれ利根川砂試料、および江戸川砂 A, B, C 試料の代表試料について、 E_{su} を式[3.38]によって排水状態を考慮した結果 E_s^* (縦軸) と、同じ応力状態で計測された排水ヤング率 E_s (横軸) を、初期構造異方性に関する係数 a について比較したものである。なお、係数 a については、既往の研究 (4.1 参照) より、考え得る範囲 ($a = 0.8 \sim 1.2$) にて検討した

ここで、ポアソン比 ν は Hoque, et al. (1996) による等方応力状態における豊浦砂の値 ($\nu = 0.17$) を用い、応力状態誘導異方性に関する係数 m は、等方圧密時に排水微小繰返し試験より得られた排水ヤング率に基づいて設定した (表 4.4.1, 4.4.2 参照)。また、Goto, (1986) が与えた豊浦砂に対するメンブレンペネトレーションの補正式より $b = 1.7 \times 10^{-3} / \ln 10$ とした。今回の実験では側方ヤング率 E_h は直接計測していないため、 E_s を a で除した値を E_{h0} とし、上記 m を用いて式[3.16]より設定している。

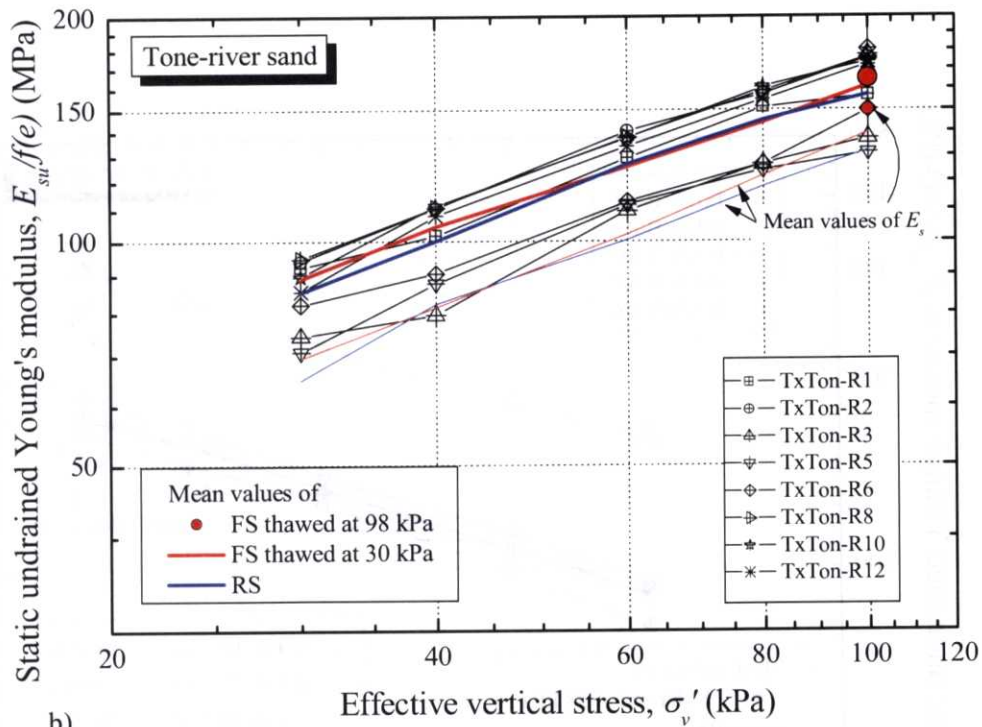
結果として、全体的に係数 a は 1.0 より小さく設定した場合 ($E_v < E_h$) の方が、非排水ヤング率 E_{su} から変換された排水ヤング率 E_s^* と排水ヤング率 E_s との関係を適切に説明できるといえる。しかし、係数 a は試料の種類により若干異なる傾向が認められる。例えば、江戸川砂 A 試料の凍結試料では $a = 1.0$ 、江戸川砂 B 試料の再構成試料では $a = 1.2$ とした場合の方が、 E_s と E_s^* の関係は比較的整合する。これらの試料の特徴として、江戸川砂 A 試料は細粒分を 60 % 以上含む砂質シルトが主体であるのに対し、他の試料は概ね均等な粒度分布を呈する細砂を主体とする。また、利根川砂試料と江戸川砂 C 試料の再構成試料は空中落下法により作成されたのに対し、江戸川砂 B 試料は供試体を 5 層に分けた振動法により作成されている。本研究では構造異方性に関する詳細な検討は行わないが、係数 a の値は試料の粒度分布や供試体作成手法の影響を受ける可能性がある。

地盤の微小変形特性に及ぼす初期構造異方性の影響が、鉛直・水平方向のどちらに卓越するかについてはこれまでに多くの研究が行われてきたが、現時点でも依然合意には至っていない。本研究では、実験による排水・非排水ヤング率の比較結果、および既往の研究で得られた異方性の程度の知見を鑑み、江戸川砂 A 試料では $a = 1.0$ 、江戸川砂 B 再構成試料では $a = 1.2$ 、その他の試料は全て $a = 0.8$ と設定して検討を進めた。

また、静的排水ヤング率 E_s から、第 3 章の式[3.46]と上述のパラメータを用いて、各試料の静的せん断剛性率 G_s^* も求めている。表 4.3.1, 4.3.2 に、最終圧密応力 σ'_{cf} における $G_s^* / f(e)$ を示した。



a)



b)

図 4.4.5 利根川砂試料の等方圧密過程における静的非排水ヤング率計測結果

a) 凍結試料, b) 再構成試料

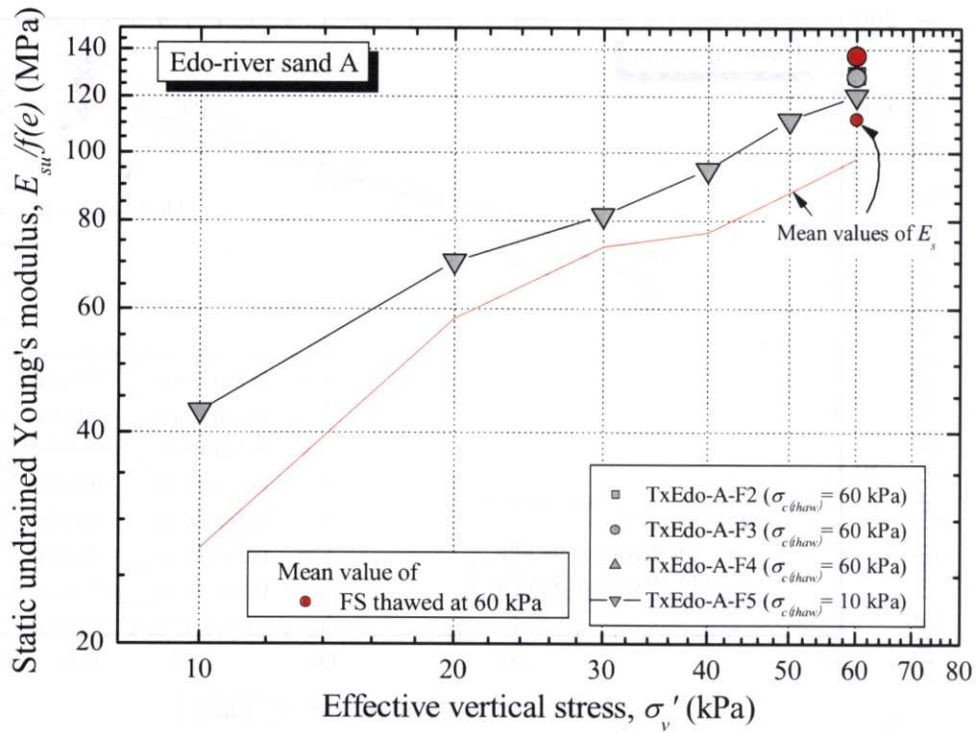


図 4.4.6 江戸川砂 A 試料の等方圧密過程における静的非排水ヤング率計測結果

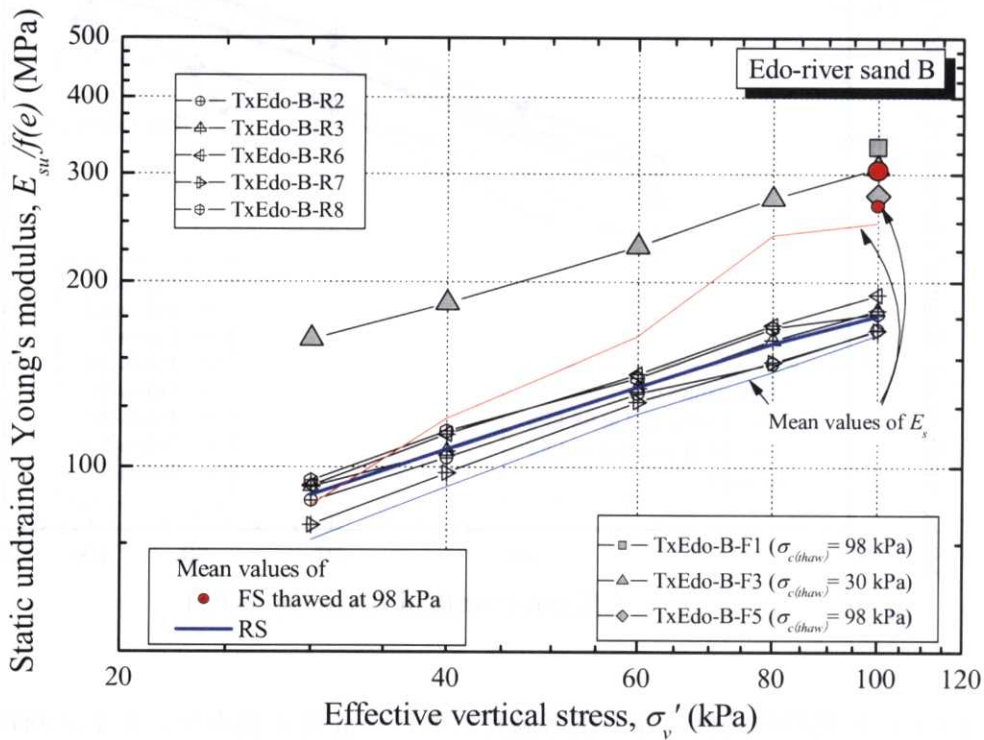


図 4.4.7 江戸川砂 B 試料の等方圧密過程における静的非排水ヤング率計測結果

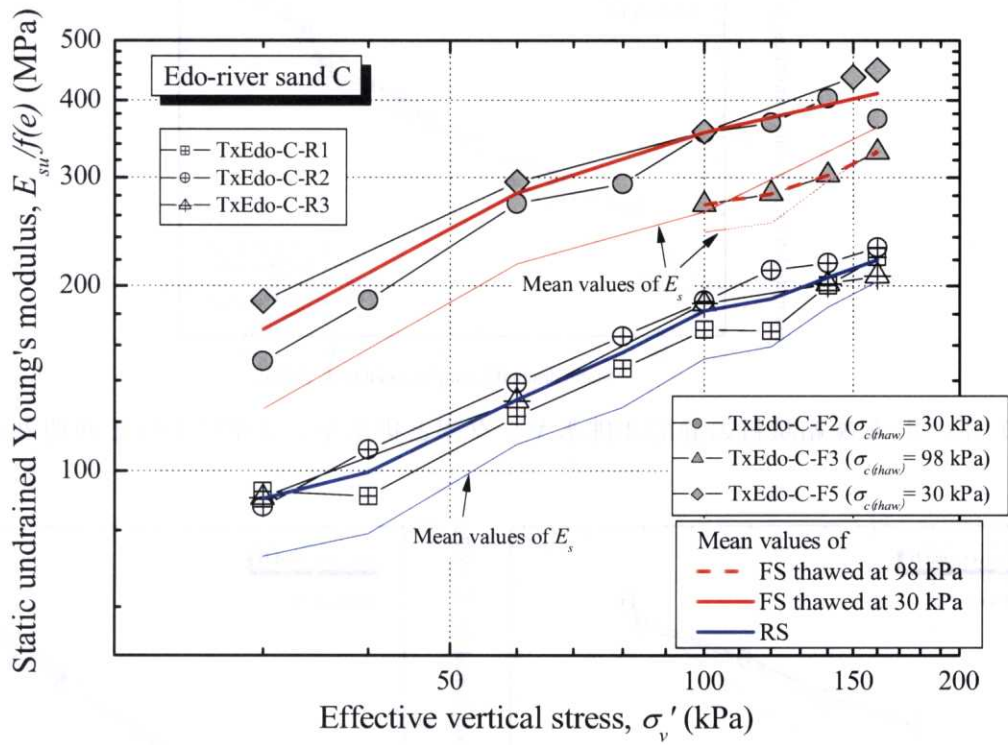


図 4.4.8 江戸川砂 C 試料の等方圧密過程における静的非排水ヤング率計測結果

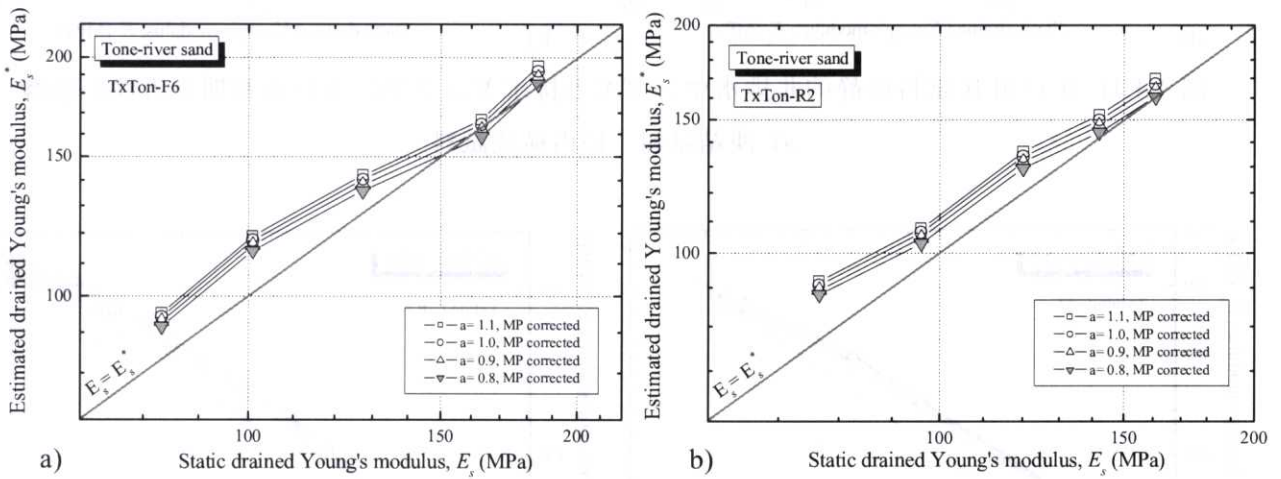


図 4.4.9 利根川砂試料の静的非排水ヤング率と排水ヤング率における初期異方性の影響

a) 凍結試料 b) 再構成試料

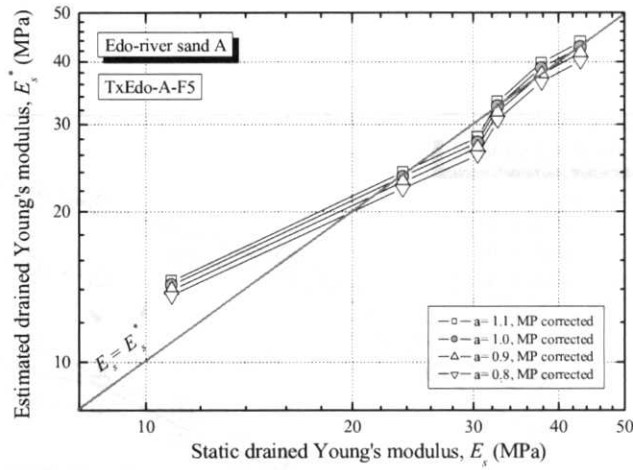


図 4.4.10 江戸川 A 凍結試料の静的非排水ヤング率と排水ヤング率における初期異方性の影響

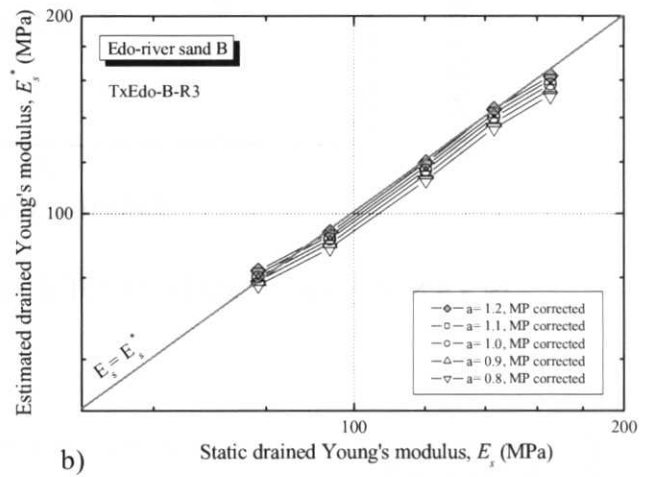
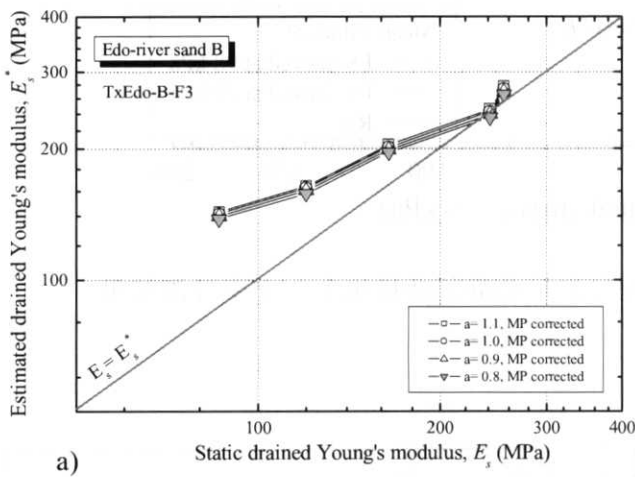


図 4.4.11 江戸川 B 試料の静的非排水ヤング率と排水ヤング率における初期異方性の影響

a) 凍結試料 b)再構成試料

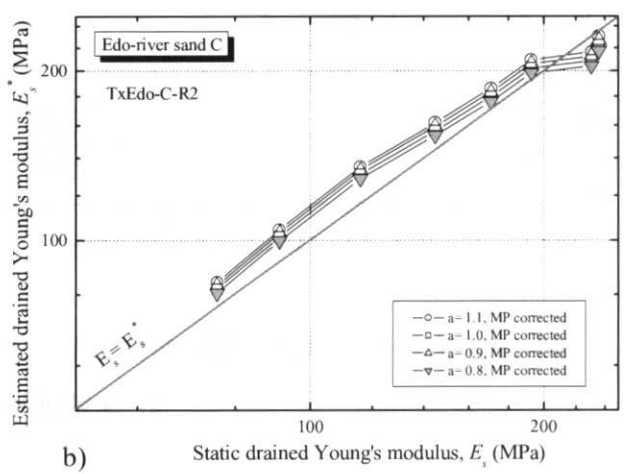
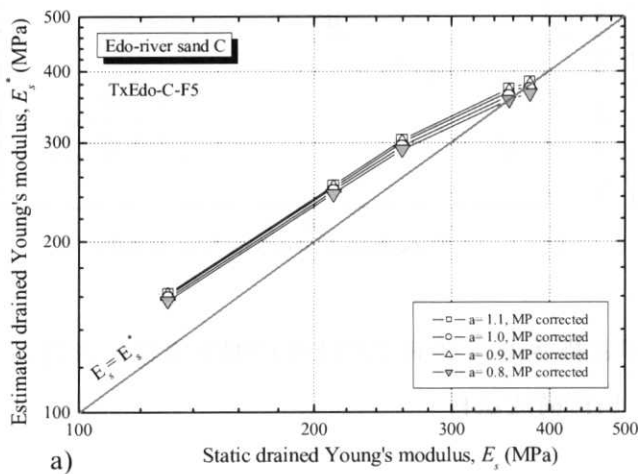


図 4.4.12 江戸川 C 試料の静的非排水ヤング率と排水ヤング率における初期異方性の影響

a) 凍結試料 b)再構成試料

(3) 静的ヤング率におけるベディングエラーの影響

これまで、静的ヤング率 E_s については、 LDT を用いた局所変位より求めた値を示したが、静的微小変形特性の計測手法としては、その他にも外部変位計（ギャップセンサー等）によるものがある。本来、外部変位計による計測手法は、 LDT と比較して、より一般的である。しかし、外部変位計による計測結果はキャップとの境界部に生じる供試体の乱れの影響（ベディングエラー）を含んでいることが知られている。

本研究においても、このベディングエラーをチェックすることを目的とし、等方圧密過程において LDT とギャップセンサー（以下 GS ）によって計測された E_s を比較した。

図 4.4.13~ 4.4.16 に、それぞれ利根川砂試料、江戸川砂 A, B, C 試料の GS と LDT による E_s の比 ($E_{s(GS)}/E_{s(LDT)}$) と有効鉛直応力 σ'_v の関係を示す。また、等方圧密過程において計測された $E_{s(GS)}/E_{s(LDT)}$ の平均値を表 4.4.1, 4.4.2 に示す。これらの結果より、凍結試料におけるベディングエラーによる E_s の低下は、江戸川砂 A 試料では 10~15%程度、その他の試料では 20~40%程度 となっている。また、再構成試料では、多少のばらつきが認められるが、概ね 10~20%程度 となっている。

凍結試料の方が再構成試料よりもベディングエラーの影響が大きくなる原因としては、供試体作成手順上、端面をヘラにより比較的容易に整形できる再構成試料に対し、凍結試料ではのこぎりやヤスリを用いるため、端面が乱された可能性が高いと考えられる。また、比較的緩い江戸川砂 A 試料では、その影響が小さくなったものと考えられる。

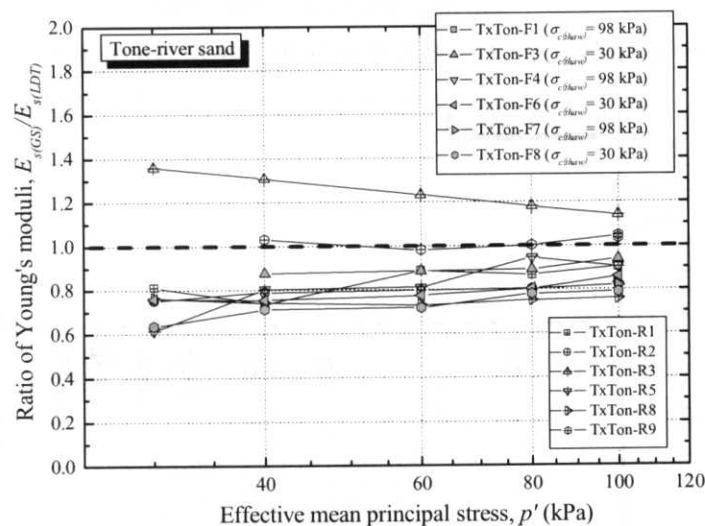


図 4.4.13 利根川砂試料における微小変形計測手法が静的排水ヤング率に及ぼす影響

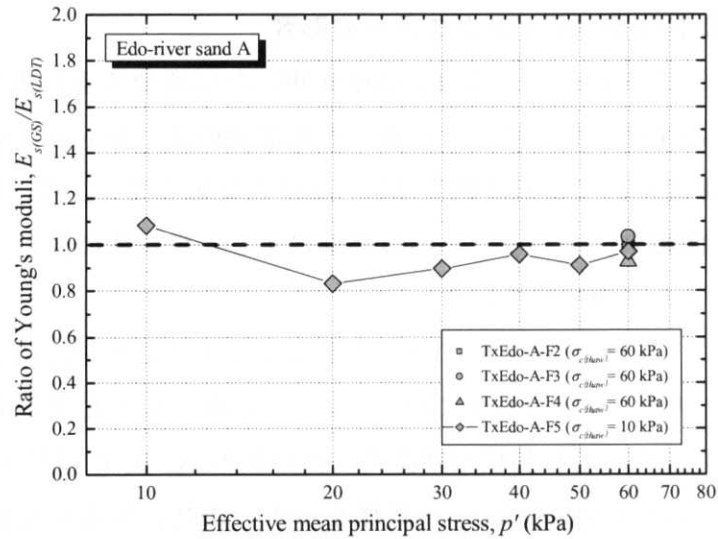


図 4.4.14 江戸川砂 A 試料における微小変形計測手法が静的排水ヤング率に及ぼす影響

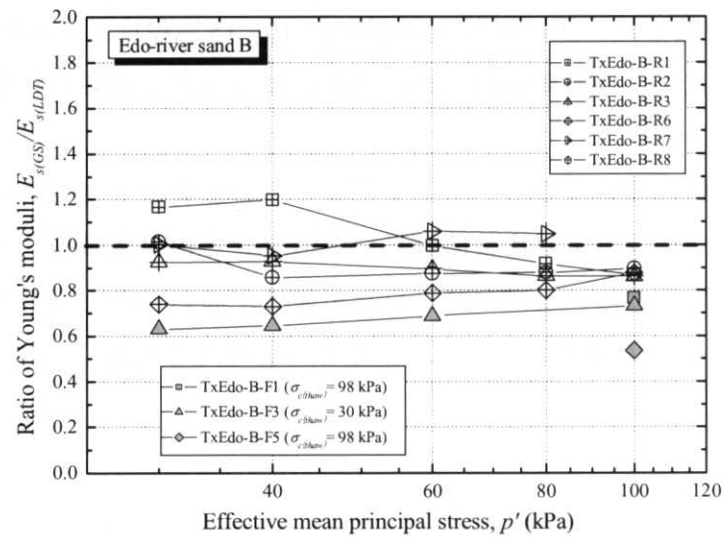


図 4.4.15 江戸川砂 B 試料における微小変形計測手法が静的排水ヤング率に及ぼす影響

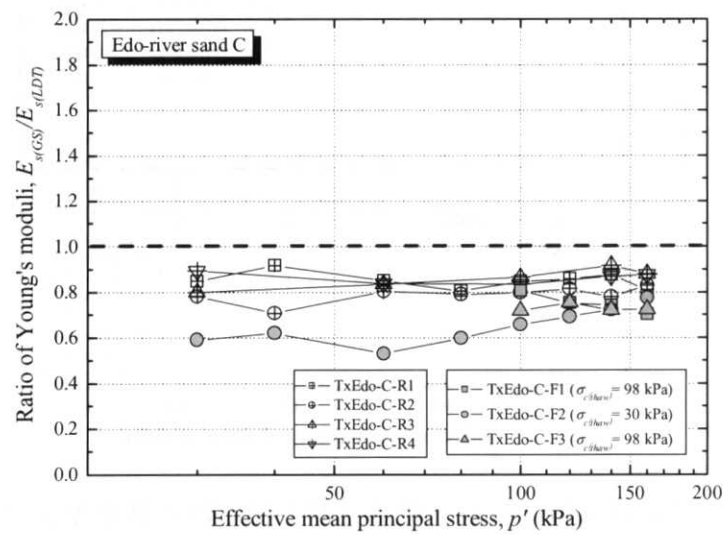


図 4.4.16 江戸川砂 C 試料における微小変形計測手法が静的排水ヤング率に及ぼす影響

4.4.2 動的微小変形特性

(1) 凍結試料と再構成試料の動的ヤング率 E_d の比較

3.4 で述べたように、飽和供試体の動的ヤング率 E_d は、非排水条件下の挙動を表している可能性が考えられる。したがって、ここでは P 波速度と密度より得られる従来 E_d (式[3.67]) だけでなく、従来 E_d を非排水ヤング率と仮定して、式[3.38]により排水ヤング率に変換した E_d^* も示した。なお、この変換に用いた各パラメーター (ν, a, m, E_h) は、前節で示した値を設定している。

表 4.4.3, 4.4.4 にそれぞれ凍結試料と再構成試料の詳細な試験結果を示す。また、図 4.4.17~4.4.20 に、各試料の動的ヤング率 E_d と E_d^* を示す。各図では、4.2.3 で述べたヤング率の応力依存性に関する既往の研究を基に、鉛直有効応力 σ'_v との関係を示している。

また、本研究では供試体を伝播する弾性波をメンブレン表面に設置した加速度計により計測しているが、加速度計の取付け方法について、試料により改良前後（詳細は第 2 章参照）のものが混在している。表 4.4.3, 4.4.4 より、この取付け方法の違いは E_d と E_d^* の結果に著しい影響を及ぼしていることがわかる。

以上を踏まえ、試料ごとに実験結果を述べる。

a) 利根川砂試料

利根川砂試料のすべての凍結試料および再構成試料の一部 (TxTon-R1~R7) では、加速度計取付け方法の改良前に実施されたものである。その他の再構成試料 (TxTon-R8~R13) は改良後に実施された。全体的に取付け方法の改良前後では、後者の方が 2~2.5 倍程度大きな動的ヤング率 E_d, E_d^* を示している。これは、取付け方法改良により、加速度計の受信波計測精度が向上したため、間隙水を伝播した P 波の影響がより顕著に表れたものと考えられる。しかし、利根川砂試料については、改良前に実施した結果が多数を占めるため、ここでは改良前のデータを基に、実験結果の傾向を述べる。

利根川砂凍結試料の動的ヤング率 $E_d/f(e)$ (図 4.4.17 a)) は、測定値にばらつきが認められるが、その平均値は再構成試料の値と比較して、最終等方圧密応力 $\sigma'_{cI} = 100$ kPa での比較では、 $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa では 10 %程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa では 28 %程度、再構成試料よりも高い値を示す。また、排水条件を考慮して変換された $E_d^*/f(e)$ (図 4.3.18) は、 $E_d/f(e)$ と比較して 10~20 %程度低減された値を示す。この傾向は、他の試料でも同様であった。凍結試料の融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違い (30 kPa と 98 kPa) が $E_d/f(e)$ および $E_d^*/f(e)$ に及ぼす影響について、最終等方圧密応力 ($\sigma'_{cI} = 100$ kPa) での比較では、 $\sigma_{c(thaw)}$ の高い試料の方が低い供試体よりも平均して 16 %程度 高くなっており、この差は静的ヤング率 E_s の場合 (平均約 7 %) よりも大きい。

また、 $E_d/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m (第 3 章, 式[3.15]参照) については、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) では $m = 0.54$ 程度、再構成試料では $m = 0.49$ 程度を示す (いずれも $R^2 > 0.95$)

のデータの平均)。

b) 江戸川砂 A 試料

江戸川砂 A 試料の実験は、加速度計取付け方法の改良後に実施された。

江戸川砂 A 試料 (図 4.4.19) では、再構成試料での実験を実施していない。凍結試料の融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違い (10 kPa と 60 kPa) が $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ に及ぼす影響について、最終等方圧密応力 ($\sigma'_{cl} = 60$ kPa) での比較では高融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 60$ kPa) の方が低融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 10$ kPa) よりも平均約 25 % 高い値を示す (静的ヤング率 E_s では約 13 %)。

また、 $E_s/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m については、一試料のみの計測値であるが、 $m = 1.1$ 程度と、かなり大きな値となっている。

c) 江戸川砂 B 試料

江戸川砂 B 試料の実験は、加速度計取付け方法の改良後に実施された。

江戸川砂 B 試料 (図 4.4.20) の凍結試料の $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ の値は、再構成試料よりも明らかに大きな値を示しており、最終等方圧密応力 $\sigma'_{cl} = 100$ kPa での比較では、 $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa では 92 % 程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa では 104 % 程度大きくなる。また、凍結試料における融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違い (30 kPa と 98 kPa) による $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ の違いは、低融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) の方が低い値を示すが、その差は比較的小さい (約 7 %)。

$E_d/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m については、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) では $m = 0.78$ 程度、再構成試料では $m = 0.65$ 程度を示し (いずれも $R^2 > 0.95$ のデータの平均)、凍結試料の方が大きな値となっている。

d) 江戸川砂 C 試料

江戸川砂 C 試料では、凍結試料の一部 (TxEdo-C-F1~F3) の実験は加速度計取付け方法改良前に実施された。それ以外の凍結試料および再構成試料は改良後に実施された。ここでは、改良後のデータを基に、実験結果の傾向を述べる。

江戸川砂 C 試料 (図 4.4.21) では、江戸川砂 B 試料と同様、 $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ は凍結試料の方が再構成試料よりも大きな値を示しており、その差は $\sigma'_{cl} = 160$ kPa において、 $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa では 47 % 程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa では 20 % 程度、凍結試料の方が大きくなる。凍結試料の融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違い (30 kPa と 98 kPa) による $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ の差は、供試体毎にばらつきが大きいいためその傾向は明確ではないが、低融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) の結果の方が 23 % 程度高い $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ の値を示す。参考までに、加速度計取付け法改良前のデータでは、高融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa) の結果の方が 21 % 程度高くなっている。

また、 $E_d/f(e)$ の応力依存性を示す係数 m については、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) ではばら

つきが大きく、精度の良い値は得られていない。一方、再構成試料では $m = 0.64$ 程度を示している ($R^2 > 0.95$ のデータの平均)。

動的ヤング率 $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ について、沖積層である利根川砂試料では凍結試料と再構成試料の差は小さく (10~28%程度)、洪積層の江戸川砂 B, C 試料では差が大きくなり (20~104%程度)、静的ヤング率 E_s の結果と同様の傾向を示した。しかし、各試料とも全体的にばらつきが大きく、応力依存性を示す係数 m の値も同一試料内で大きな差が生じている。

また、利根川砂試料と江戸川砂 C 試料の結果より、加速度計取付け方法改良前後で、 $E_d/f(e)$, $E_d^*/f(e)$ の値に非常に大きな差が生じている。特に改良後の $E_d/f(e)$ は、第 3 章にて示した乾燥試料の結果と比較すると非常に大きな値となっている。この原因としては、加速度計取付け方法の改良により P 波の受信精度が向上し、改良前には感知できなかった間隙水を伝播する P 波の影響が顕著に表れたものと考えられる。

一方、融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の差が動的ヤング率に及ぼす影響については、利根川砂試料および江戸川砂 A では、 $\sigma_{c(thaw)}$ の低い方が $\sigma_{c(thaw)}$ の高い供試体よりも $E_d/f(e)$ は低下しており (16~25%程度)、その影響は静的ヤング率 E_s のケース (7~13%程度) よりも顕著である。一方、江戸川砂 B 試料では、融解拘束圧の差の影響は小さく、 $\sigma_{c(thaw)}$ の差による $E_d/f(e)$ の差は約 7% であった。

表 4.4.3 凍結試料の動的微小変形特性計測結果

試料名 (最終圧密圧力) σ'_{cl}	試料 No.	$\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	Void ratio at σ'_{cl}	$E_d/f(e)$ at σ'_{cl}	$E_d^*/f(e)$ at σ'_{cl}	$G_d/f(e)$ at σ'_{cl}	$m (R^2)$	$n (R^2)$
利根川砂 (100 kPa)	TxTon-F1*	98	0.720	311.4	255.6	89.0	-	-
	TxTon-F2*	98	0.750	327.5	268.9	98.6	-	-
	TxTon-F3*	30	0.715	273.4	224.0	80.2	0.543 (0.967)	0.379 (0.989)
	TxTon-F4*	98	0.734	273.4	224.5	94.8	-	-
	TxTon-F5*	98	0.764	320.6	263.2	99.5	-	-
	TxTon-F6*	30	0.708	247.4	204.5	81.2	0.593 (0.932)	0.568 (0.962)
	TxTon-F7*	98	0.725	285.8	234.6	83.7	-	-
	TxTon-F8*	30	0.729	262.5	215.1	79.7	0.767 (0.947)	0.321 (0.925)
江戸川砂 A (60 kPa)	TxEdo-A-F2	60	1.167	545.3	441.1	63.5	-	-
	TxEdo-A-F3	60	1.157	568.0	459.5	62.4	-	-
	TxEdo-A-F4	60	1.184	548.9	444.0	64.1	-	-
	TxEdo-A-F5	10	1.189	442.9	358.2	54.4	1.091 (0.983)	0.134 (0.876)
江戸川砂 B (100 kPa)	TxEdo-B-F1	98	0.838	-	-	132.6	-	-
	TxEdo-B-F3	30	0.811	1105.8	936.0	121.2	0.644 (0.984)	0.450 (1.000)
	TxEdo-B-F4	30	0.835	1058.2	895.7	116.0	0.911 (0.980)	0.580 (0.997)
	TxEdo-B-F5	98	0.815	1152.8	975.8	125.7	-	-
江戸川砂 C (160 kPa)	TxEdo-C-F2*	30	0.710	607.1	511.5	244.9	0.619 (0.768)	0.182 (0.533)
	TxEdo-C-F3*	98	0.696	812.3	692.9	257.6	0.383 (0.915)	0.451 (0.999)
	TxEdo-C-F4	98	0.818	1043.1	870.9	309.7	0.260 (0.915)	0.416 (0.996)
	TxEdo-C-F5	30	0.834	1282.7	1078.0	295.5	0.334 (0.941)	0.343 (0.854)

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

表 4.4.4 再構成試料の動的微小変形特性計測結果

試料名 (最終圧密圧力) σ'_{cl}	試料 No.	σ_{c0} (kPa)	Void ratio at σ'_{cl}	$E_d/f(e)$ at σ'_{cl}	$E_d^*/f(e)$ at σ'_{cl}	$G_d/f(e)$ at σ'_{cl}	$m (R^2)$	$n (R^2)$	
利根川砂 再構成試料 (100 kPa)	TxTon-R1*	30	0.720	253.5	206.0	69.1	0.316 (0.857)	0.524 (0.997)	
	TxTon-R2*	30	0.763	271.1	221.0	76.2	0.467 (0.948)	0.506 (0.994)	
	TxTon-R3*	30	0.732	253.3	203.8	76.3	0.620 (0.831)	0.633 (0.986)	
	TxTon-R5*	30	0.709	234.4	190.2	69.8	0.488 (0.971)	0.516 (1.000)	
	TxTon-R6*	30	0.692	-	-	70.8	-	0.460 (0.969)	
	TxTon-R7*	30	0.710	178.0	143.1	70.8	0.292 (0.819)	0.669 (0.960)	
	TxTon-R8	30	0.730	593.9	485.4	71.4	0.663 (0.980)	0.439 (0.954)	
	TxTon-R9	40	0.764	551.1	450.1	77.2	0.564 (0.987)	0.307 (0.858)	
	TxTon-R10	30	0.771	631.3	515.5	73.1	0.647 (0.800)	0.407 (0.948)	
	TxTon-R11	40	0.764	-	-	75.3	-	0.533 (0.943)	
	TxTon-R12	30	0.748	561.1	456.1	62.7	0.433 (0.949)	0.479 (0.994)	
	TxTon-R13	30	0.694	-	-	55.8	-	0.477 (0.985)	
	江戸川砂 B 再構成試料 (100 kPa)	TxEdo-B-R1	30	0.740	494.8	436.9	72.1	0.618 (0.966)	0.566 (0.997)
TxEdo-B-R2		30	0.830	590.6	515.5	94.9	0.692 (0.968)	0.551 (1.000)	
TxEdo-B-R3		30	0.805	552.2	483.6	85.9	0.656 (0.967)	0.489 (0.995)	
TxEdo-B-R6		30	0.828	551.2	482.2	92.0	0.537 (0.946)	0.566 (0.998)	
TxEdo-B-R7		30	0.826	484.2	422.1	96.5	0.576 (0.962)	0.564 (0.996)	
TxEdo-B-R8		30	0.844	514.8	450.8	89.7	0.679 (0.830)	0.538 (0.995)	
TxEdo-B-R9		30	0.859	691.4	605.1	106.8	0.884 (0.880)	0.487 (0.960)	
TxEdo-B-R10		30	0.828	630.6	551.9	93.8	0.715 (0.991)	0.553 (0.999)	
江戸川砂 C 再構成試料 (160 kPa)		TxEdo-C-R1	30	0.755	819.1	663.7	143.1	0.516 (0.943)	0.562 (0.995)
		TxEdo-C-R2	30	0.746	845.1	685.8	146.5	0.642 (0.976)	0.594 (0.994)
	TxEdo-C-R3	30	0.764	1008.7	812.1	152.5	0.469 (0.905)	0.530 (0.995)	
	TxEdo-C-R4	30	0.780	956.2	773.6	153.9	0.522 (0.754)	0.526 (0.986)	
	TxEdo-C-R6	60	0.696	703.1	576.3	140.8	0.150 (0.564)	0.553 (0.999)	
	TxEdo-C-R7	60	0.715	916.6	747.9	107.1	0.312 (0.814)	0.452 (0.941)	
	TxEdo-C-R11	30	0.727	835.4	676.9	131.5	0.566 (0.909)	0.647 (0.992)	

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

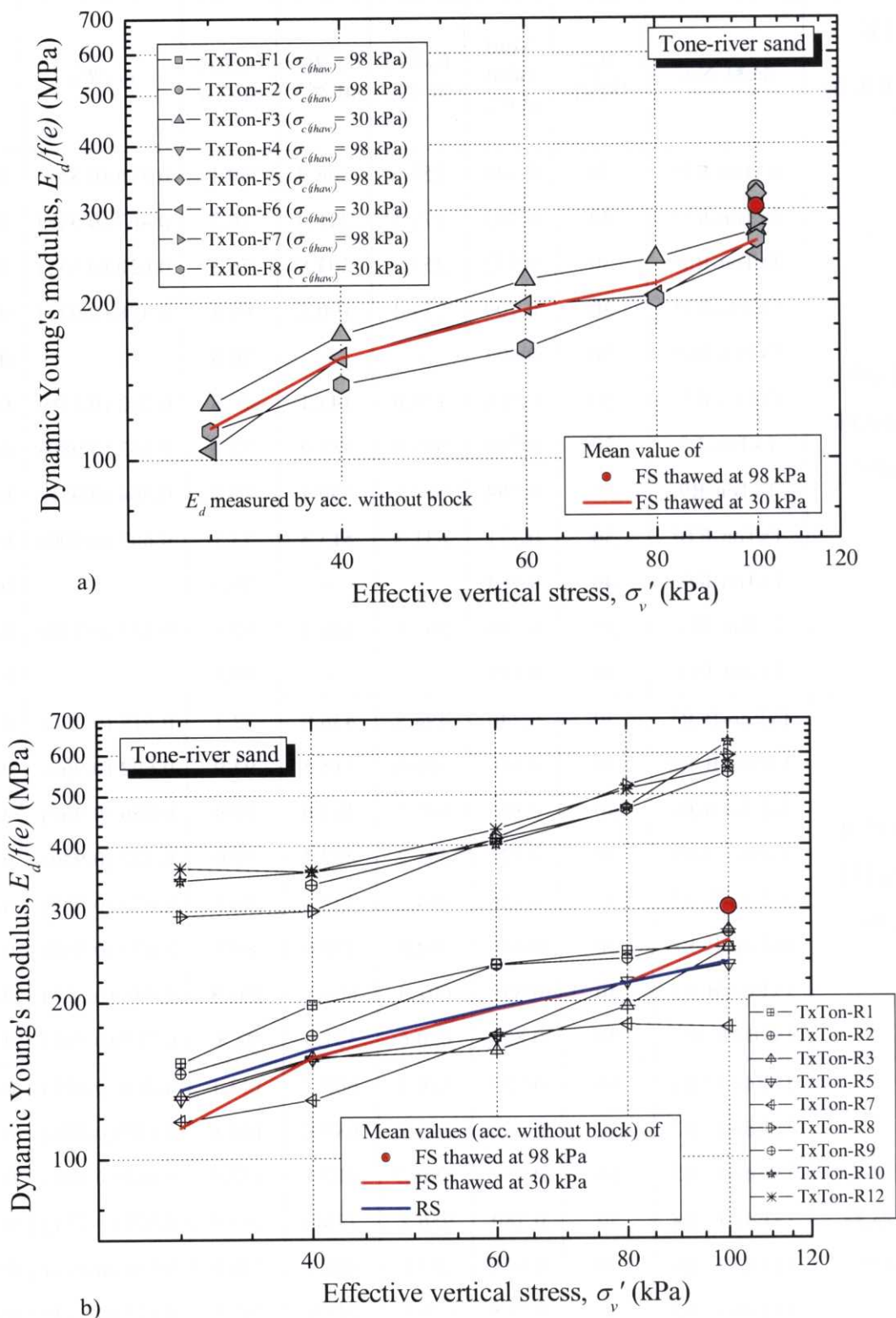


図 4.4.17 利根川砂試料の等方圧密過程における動的ヤング率 $E_d/f(e)$ 計測結果

a) 凍結試料 b) 再構成試料

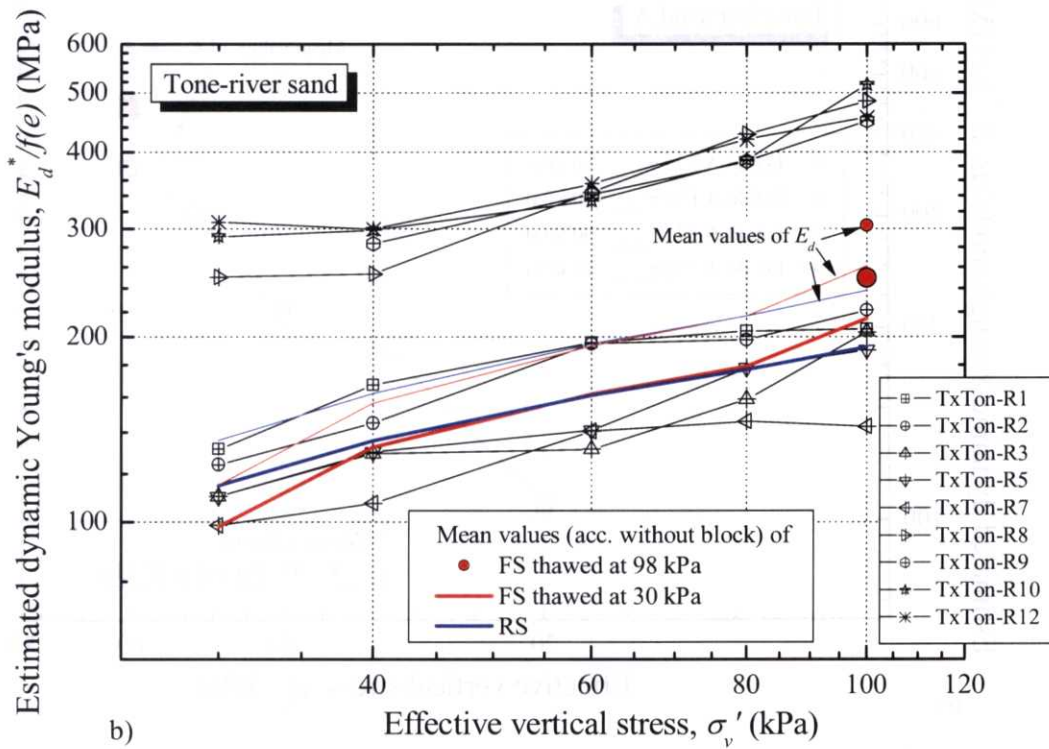
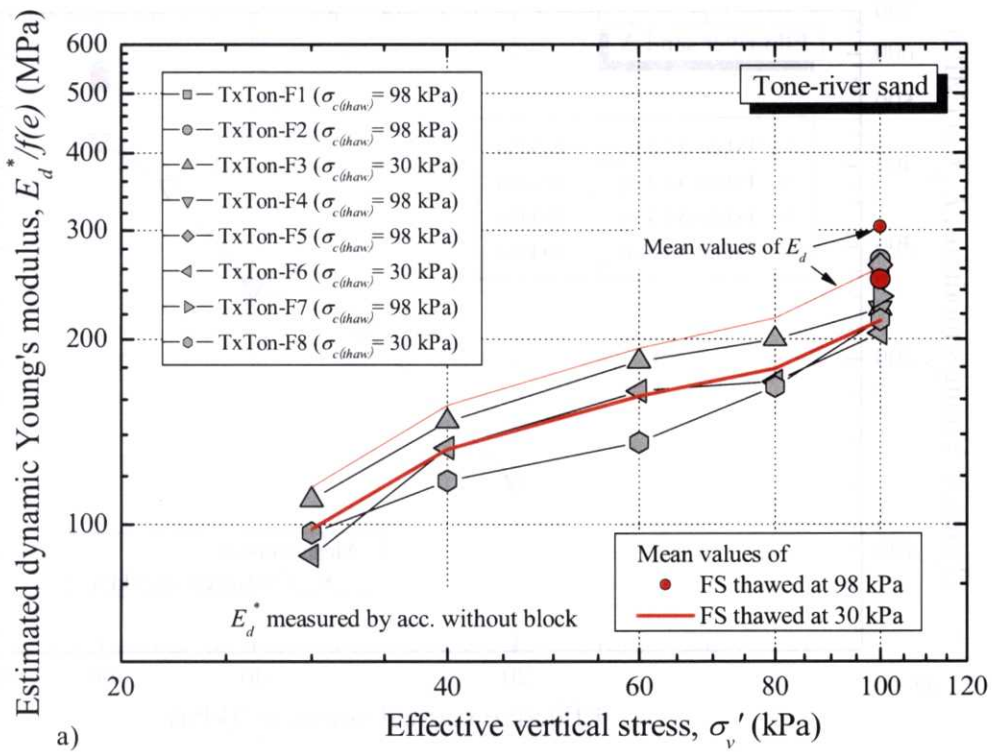


図 4.4.18 利根川砂試料の排水条件を考慮した動的ヤング率 $E_d^*/f(e)$ 計測結果

a) 凍結試料 b) 再構成試料

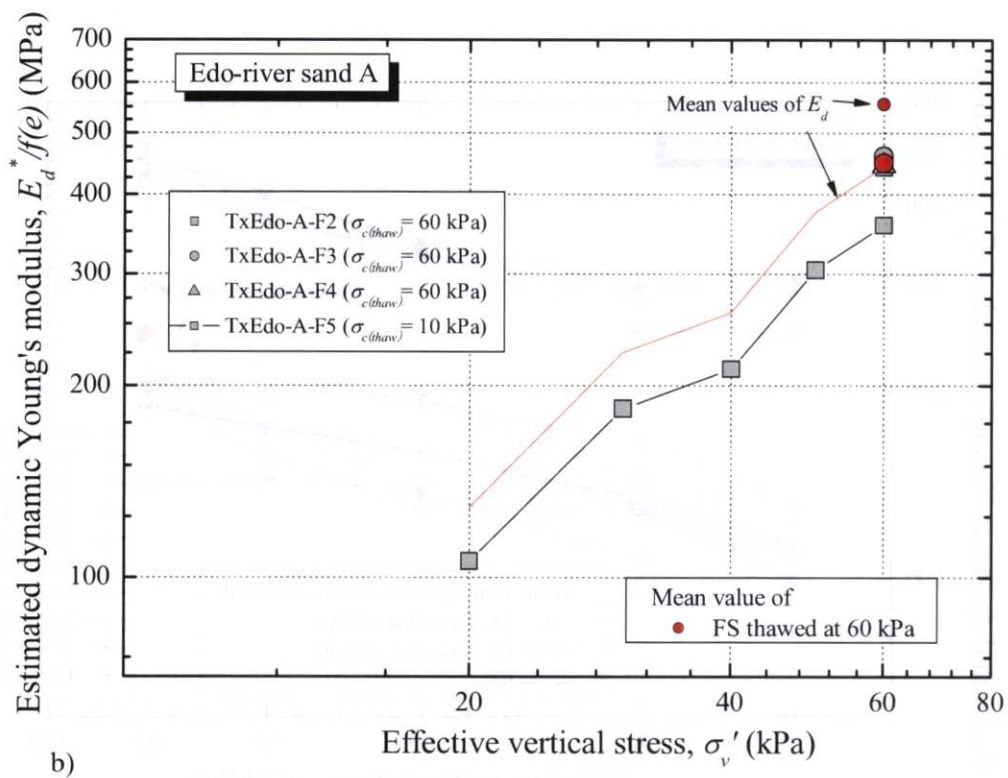
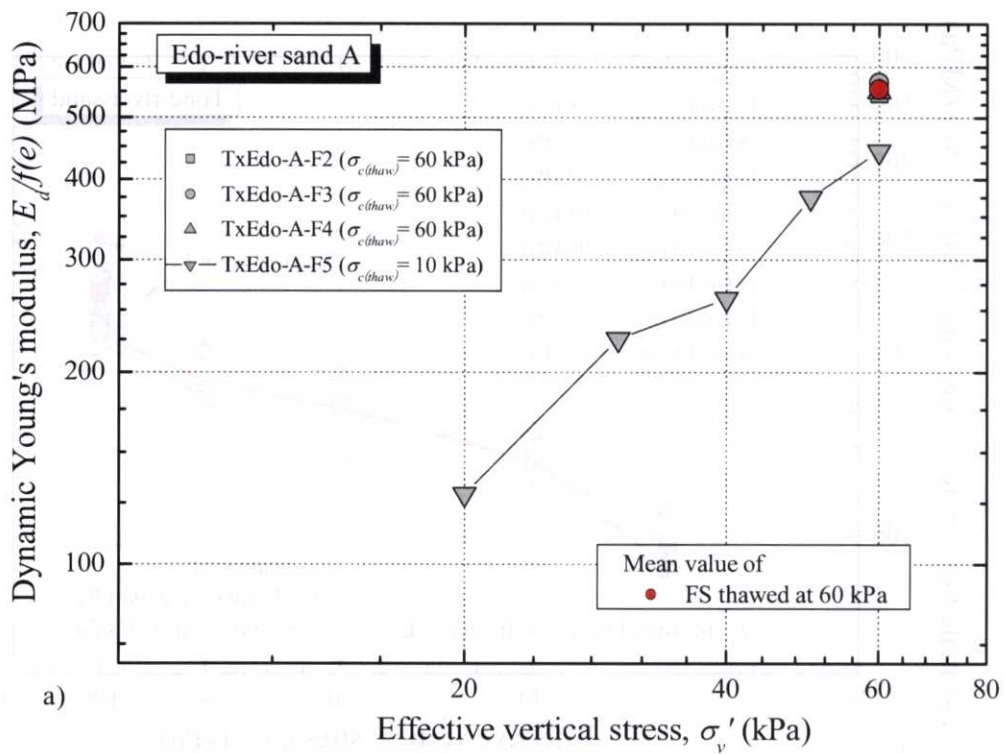


図 4.4.19 江戸川砂 A 試料の等方圧密過程における動的ヤング率計測結果

a) $E_d/f(e)$ b) $E_d^*/f(e)$

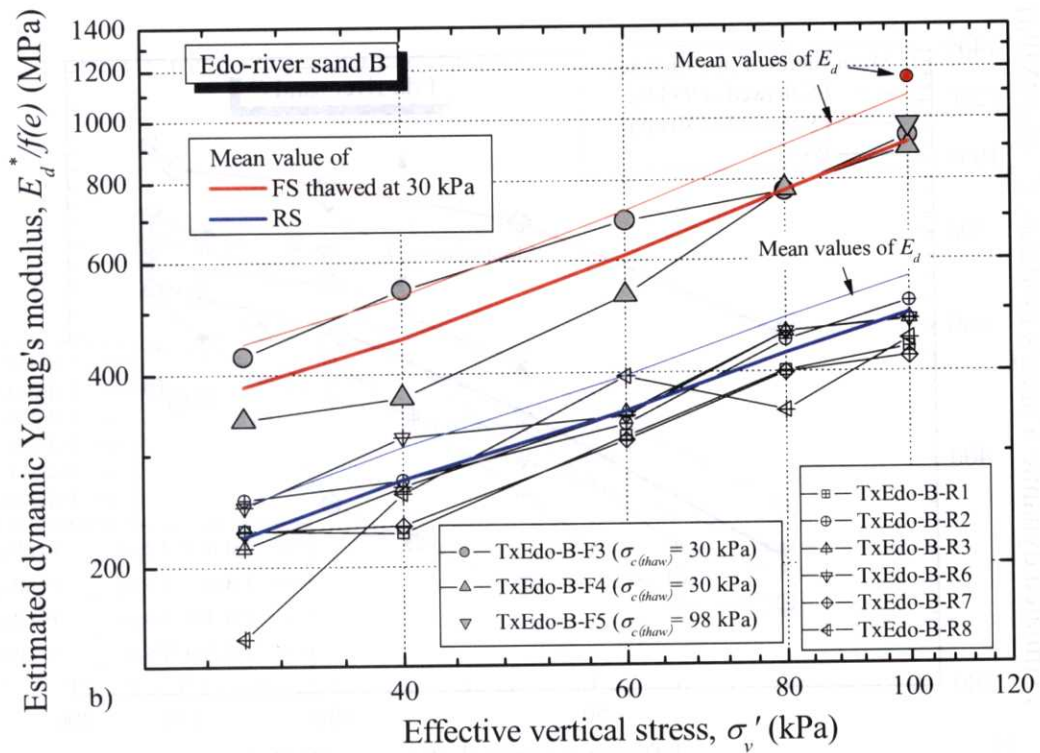
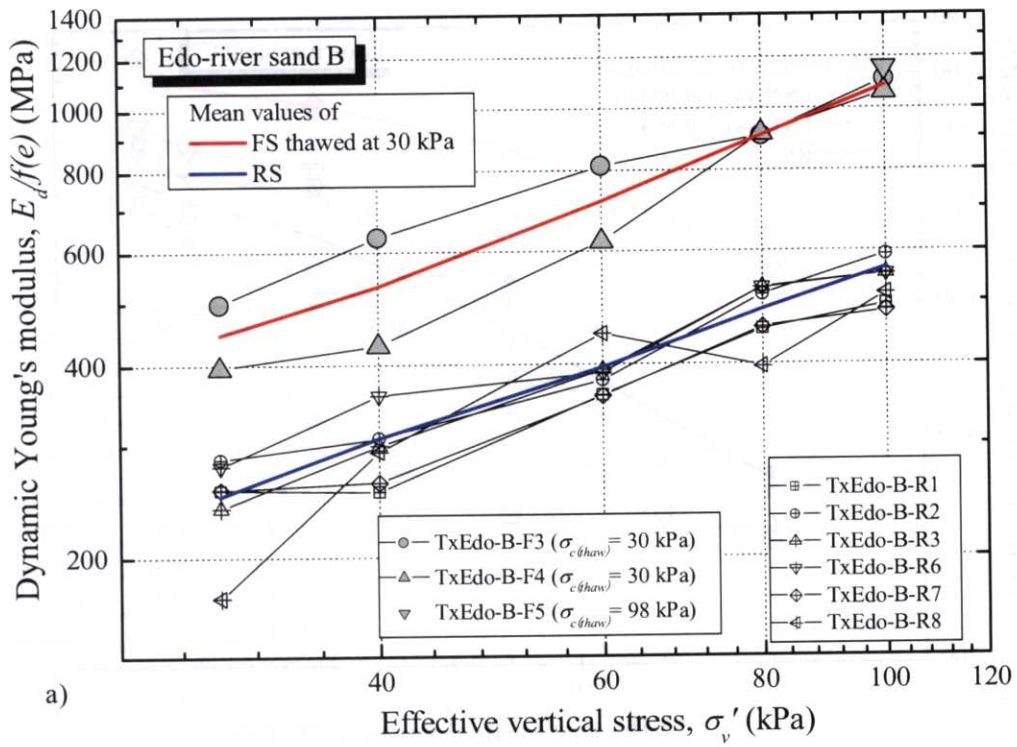


図 4.4.20 江戸川砂 B 試料の等方圧密過程における動的ヤング率計測結果

a) $E_d/f(e)$ b) $E_d^*/f(e)$

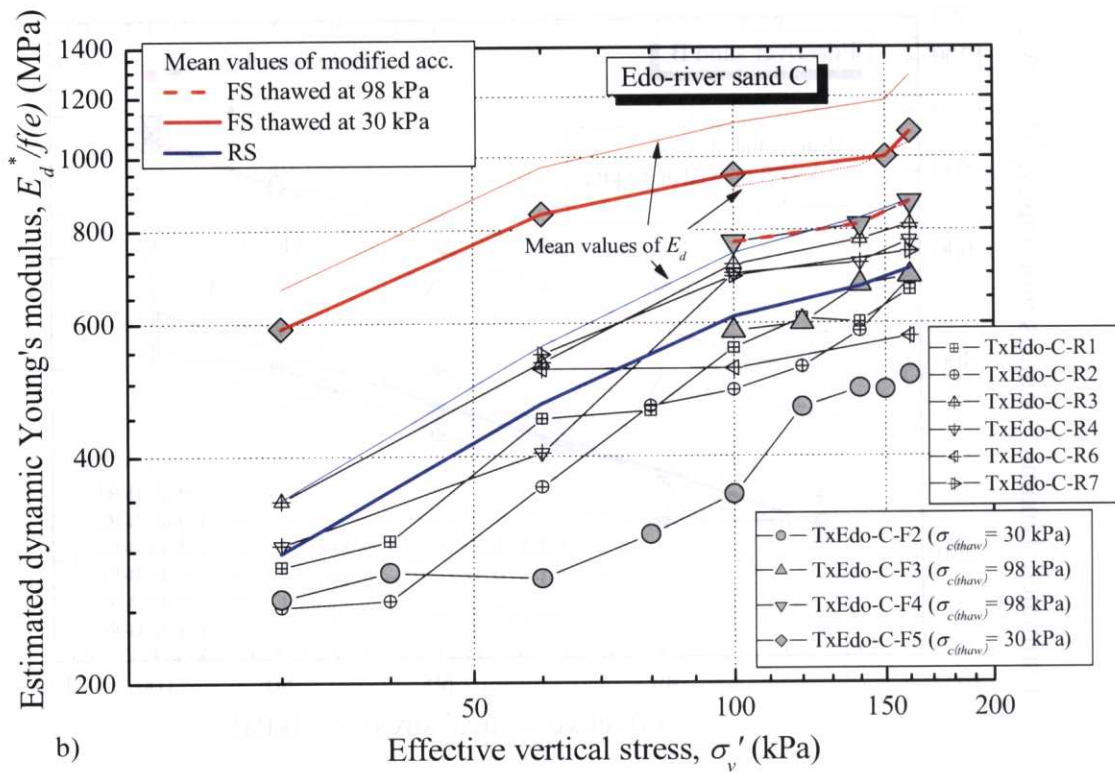
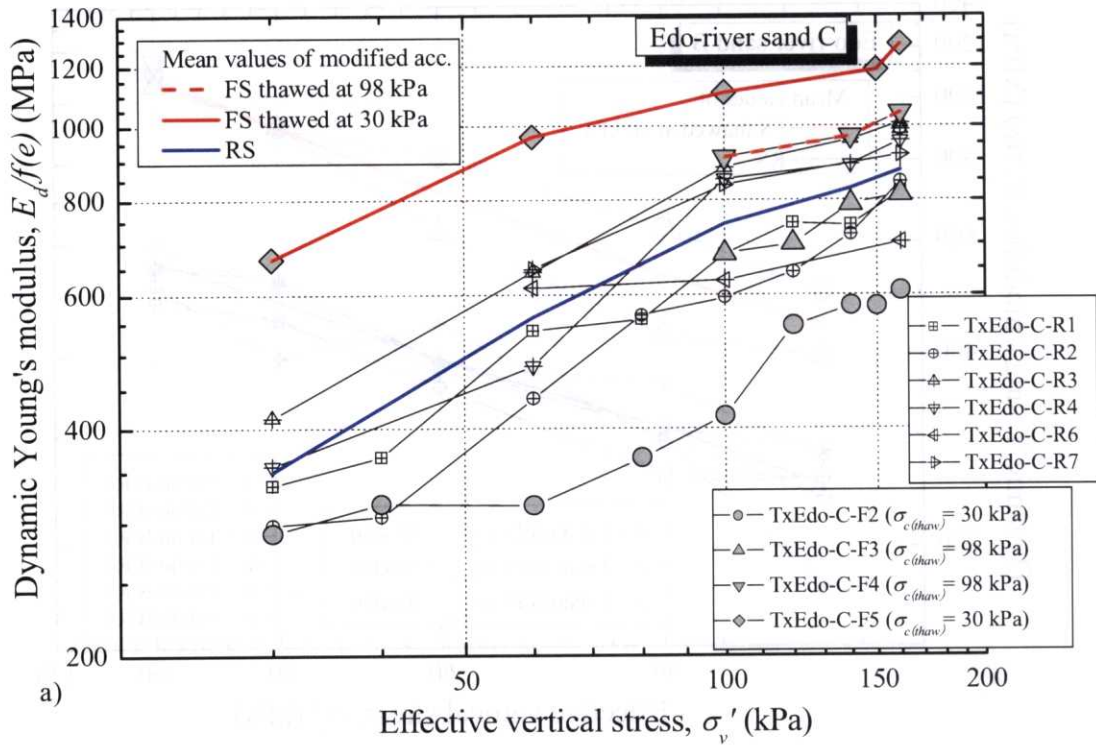


図 4.4.21 江戸川砂 C 試料の等方圧密過程における動的ヤング率計測結果

a) $E_d/f(e)$ b) $E_d^*/f(e)$

(2) 凍結試料と再構成試料の動的せん断剛性率 G_d の比較

動的せん断剛性率 $G_d/f(e)$ の詳細な結果については、表 4.4.3, 4.4.4 に既に示した。ここでは、図 4.4.22~4.4.25 に、各試料の $G_d/f(e)$ と応力パラメータ $(\sigma'_v, \sigma'_h)^{0.5}$ との関係を示している。また、 G_d の応力依存性を示す係数 n は、基準応力 $\sigma'_{v0}, \sigma'_{h0}$ での $(G_d)_0$ により、下式の関係により求められたものである。

$$G_d = (G_d)_0 \cdot \left(\frac{(\sigma'_v \cdot \sigma'_h)}{(\sigma'_{v0} \cdot \sigma'_{h0})} \right)^{n/2} \quad [4.2]$$

なお、各図には原位置 PS 検層（サスペンション法）による S 波速度から求めたせん断剛性率も加筆しているが、原位置は異方応力状態 ($K_0=0.5$) と仮定し、当該層の層厚分の応力幅を考慮して結果を整理した。

以下、各試料の実験結果を述べる。

a) 利根川砂試料

利根川砂試料における凍結試料の動的せん断剛性率 $G_d/f(e)$ (図 4.4.22) は、動的ヤング率 E_d と比較してまとまった分布を呈している。凍結試料と再構成試料との比較では、再構成試料の結果にばらつきが認められるものの、最終等方圧密応力 ($\sigma'_{cI} = 100$ kPa) での比較では、 $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa の試料では 14 %程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa の試料では 32 %程度、凍結試料の方が大きな値を示す。また、 $G_d/f(e)$ に及ぼす融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の影響については、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa の方が 30 kPa の場合より、 $G_d/f(e)$ の値は平均 16 %程度 大きくなっている。

原位置 PS 検層結果と室内試験結果との比較では、計測時の応力状態が異なるため一概には言えないが、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa の凍結試料による結果と概ね同等の値を示している。このため、原位置と室内試験における動的微小変形特性の整合性が試料の乱れに対する健全性を示すと考えると、 $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa で融解させた凍結試料の乱れはほとんどないものと考えられる。

また、 $G_d/f(e)$ の応力依存性を示す係数 n については、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa) では $n = 0.47$ 程度、再構成試料は $n = 0.52$ 程度 (いずれも $R^2 > 0.95$ のデータの平均) を示し、凍結試料の方が小さな値を示す。

b) 江戸川砂 A 試料

江戸川砂 A 試料 (図 4.4.23) における凍結試料の融解拘束圧 σ_{thaw} の違いが $G_d/f(e)$ に及ぼす影響について、最終等方圧密応力 ($\sigma'_{cI} = 60$ kPa) での比較では、 $\sigma_{c(thaw)} = 60$ kPa の試料の方が $\sigma_{c(thaw)} = 10$ kPa の試料よりも平均約 16 % 高い値を示す。

原位置 PS 検層結果と室内試験結果を比較すると、前者のほうが高い値を示す。原位置有

効上載圧と同じ拘束圧 ($\sigma_{c(thaw)} = 60 \text{ kPa}$) で融解させた試料でも *PS* 検層結果より低い値を示していること、および当該試料の細粒分含有率が 60 %を超えていることから、凍結時の膨張作用により試料が乱れていた可能性が考えられる。

また、 $G_d/f(e)$ の応力依存性を示す係数 n については、ばらつきが大きく、精度の良い値 ($R^2 > 0.95$ のデータ) は得られていない。

c) 江戸川砂 B 試料

江戸川砂 B 試料 (図 4.4.24) では、凍結試料の $G_d/f(e)$ は再構成試料よりも明らかに高い値を示している。その程度は、最終等方圧密応力 ($\sigma'_{cl} = 100 \text{ kPa}$) において、 $\sigma_{c(thaw)} = 30 \text{ kPa}$ の試料では 30 %程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98 \text{ kPa}$ の試料では 41 %程度、凍結試料の方が大きい。また、融解拘束圧の影響については、高融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 98 \text{ kPa}$) の方が低融解拘束圧試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30 \text{ kPa}$) よりも高い値を示すが、その程度は平均 9 %程度であり、利根川砂試料や江戸川砂 A 試料と比較して小さい。

原位置 *PS* 検層結果と室内試験結果との比較では、全体的に実験結果のほうが若干低い $G_d/f(e)$ を示している (融解拘束圧 $\sigma_{thaw} = 98 \text{ kPa}$ の凍結試料の平均値と比較して 9%程度の差)。

また、 $G_d/f(e)$ の応力依存性を示す係数 n については、凍結試料 ($\sigma_{c(thaw)} = 30 \text{ kPa}$) では $n = 0.51$ 程度、再構成試料は $n = 0.54$ 程度 (いずれも $R^2 > 0.95$ のデータの平均) を示し、凍結試料の方が若干小さな値を示す。

d) 江戸川砂 C 試料

江戸川砂 C 試料 (図 4.4.25) では、凍結試料の $G_d/f(e)$ は再構成試料よりも高い値を示しており、江戸川砂 B 試料と同様の傾向が認められる。その程度は、最終等方圧密応力 ($\sigma'_{cl} = 100 \text{ kPa}$) において、 $\sigma_{c(thaw)} = 30 \text{ kPa}$ の試料では 94 %程度、 $\sigma_{c(thaw)} = 98 \text{ kPa}$ の試料では 104 %程度、凍結試料の方が大きい。融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の影響については、江戸川砂 C 試料ではほとんど認められず、 $\sigma_{c(thaw)} = 98 \text{ kPa}$ の方が 30 kPa の場合より、 $G_d/f(e)$ の値は平均 5 %程度大きくなる程度である。

原位置 *PS* 検層結果との比較では、全体的に凍結試料の結果がばらついているため一概にはいえないが、両者の $G_d/f(e)$ は概ね同等の値であるといえよう。

また、 $G_d/f(e)$ の応力依存性を示す係数 n については、凍結試料では $n = 0.43$ 程度、再構成試料は $n = 0.57$ 程度 (いずれも $R^2 > 0.95$ のデータの平均) を示し、凍結試料の方が低い値となる。

動的せん断剛性率 $G_d/f(e)$ の計測結果については、これまで示した静的ヤング率 E_s および動的ヤング率 E_d と比較して、ばらつきが少なく安定した結果が得られている。全体的には、凍結試

料と再構成試料の差が大きく現れており、その傾向は沖積層の利根川砂試料よりも、洪積層の江戸川砂 B, C 試料に顕著に表れている。また、江戸川砂 B 試料よりも C 試料の方がその差は大きくなっている。この原因としては、年代効果の影響が考えられることを既に示したが、動的せん断剛性率では応力依存性を示す係数 n にもその傾向が認められた。即ち、係数 n は凍結試料の方が再構成試料より低い値を示し、その差は江戸川砂 C 試料（洪積層）では比較的大きくなった。これは、洪積層の場合、拘束圧が低下しても年代効果の影響で再構成試料よりも高い剛性を発揮できることを示唆しており、土粒子間に発達するセメンテーションについて検討した Kohata et al. (1997) および Koseki & Ohta (2001) の報告と対応している。

また、利根川砂試料（沖積層）では、 $G_d/f(e)$ に及ぼす融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の影響が江戸川砂 B, C 試料（洪積層）と比較して顕著であった。また、高い $\sigma_{c(thaw)}$ の凍結試料では、原位置 PS 検層結果概ね同程度の $G_d/f(e)$ が得られた。このような傾向は、 $\sigma_{c(thaw)}$ の低下は $G_d/f(e)$ の低下を招き、結果として供試体の乱れにつながることを示唆している。

また、(1) の動的ヤング率 $E_d/f(e)$ では、加速度計取付け方法の改良前後において非常に大きな差が生じていた。これに対し、 $G_d/f(e)$ では改良前後で顕著な差は生じていない。具体的な比較例として、図 4.3.26 に利根川砂再構成試料における加速度計取付け方法改良前後の $G_d/f(e)$ の比較結果を示すが、両者の平均値はほぼ一致している。

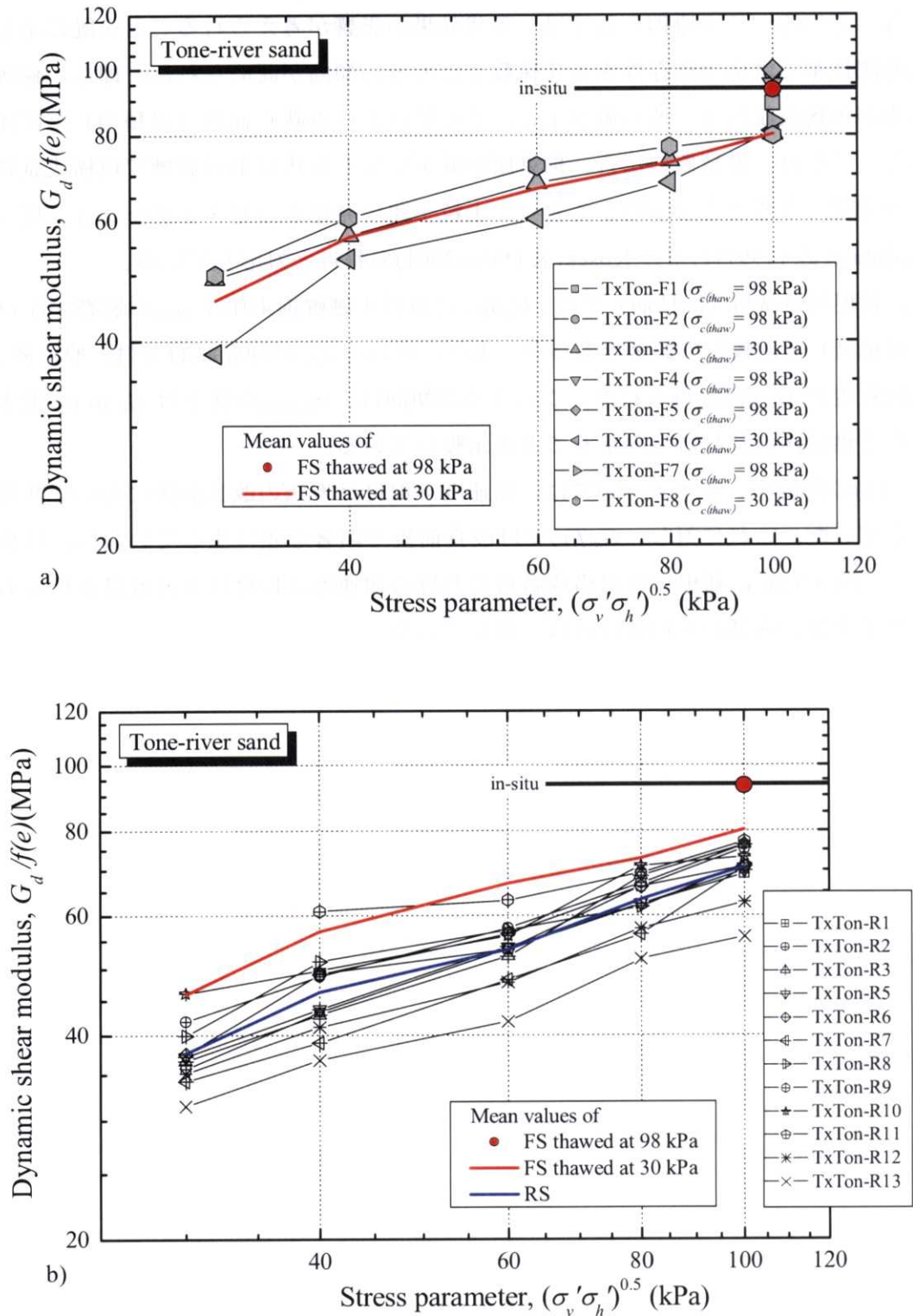


図 4.4.22 利根川砂試料の等方圧密過程における動的せん断剛性率計測結果
 a) 凍結試料, b) 再構成試料

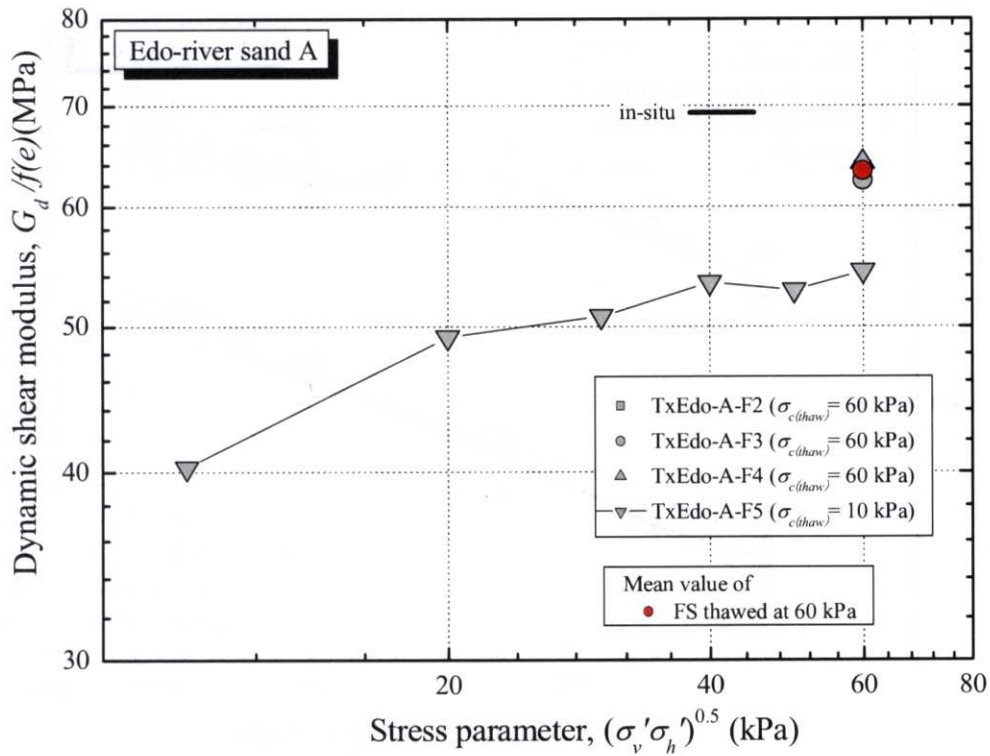


図 4.4.23 江戸川砂 A 試料の等方圧密過程における動的せん断剛性率計測結果

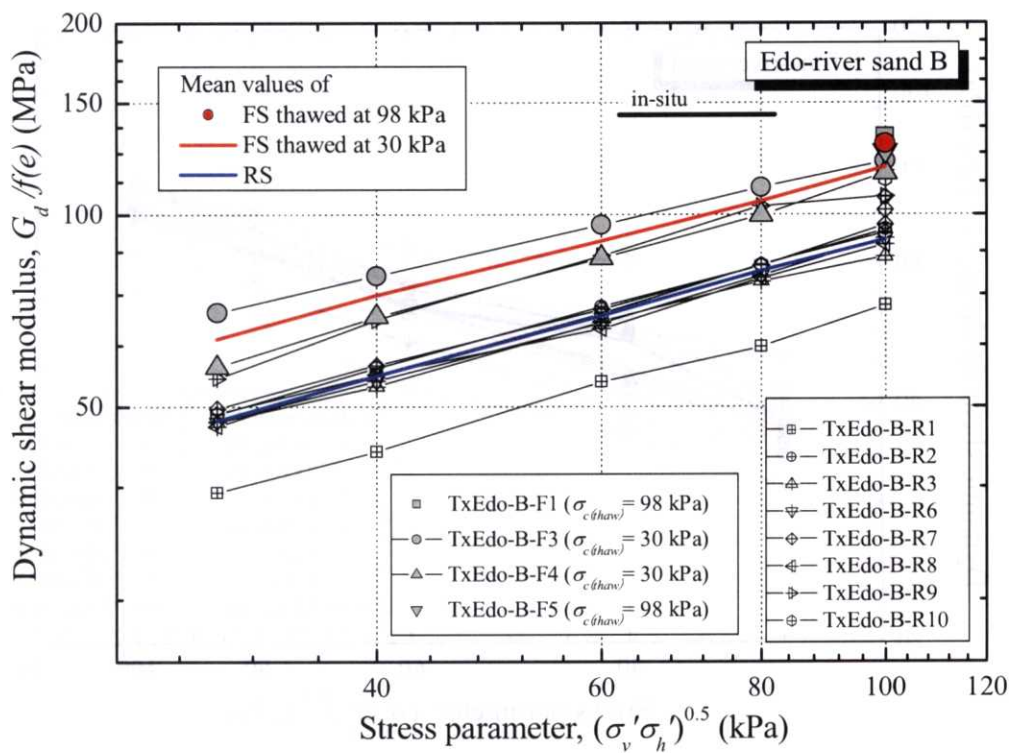


図 4.4.24 江戸川砂 B 試料の等方圧密過程における動的せん断剛性率計測結果

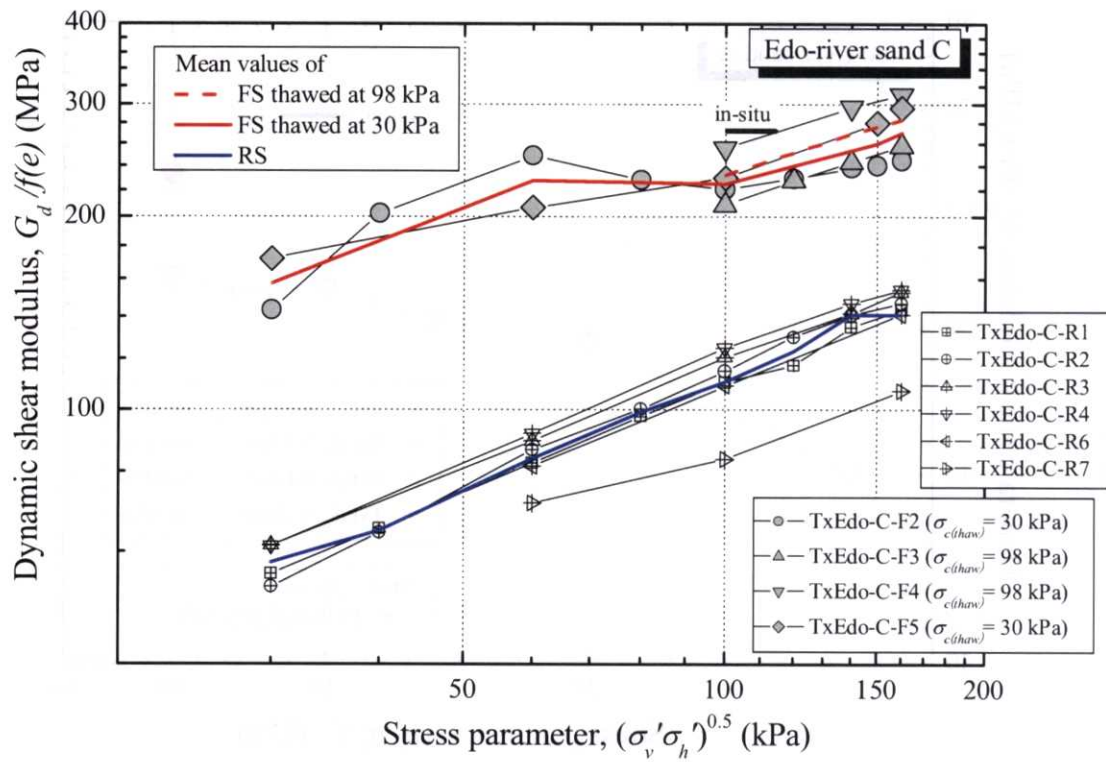


図 4.4.25 江戸川砂 C 試料の等方圧密過程における動的せん断剛性率計測結果

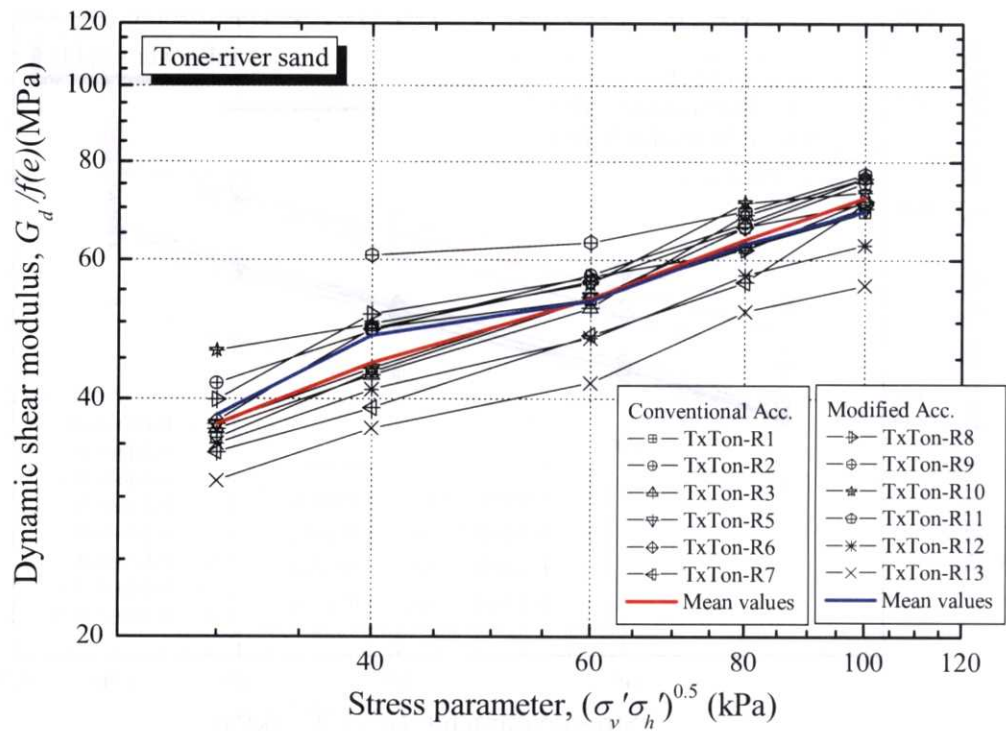


図 4.4.26 加速度計取り付け方法改良前後の動的せん断剛性率の比較 (利根川砂試料)

4.4.3 静的と動的微小変形特性の比較

これまで静的ヤング率 E_s 、動的ヤング率 E_d および動的せん断剛性率 G_d に関して、個別に論じてきたが、ここでは同じ応力状態において計測されたこれらの微小変形特性を比較する。なお、本研究では静的せん断剛性率は求められていないことから、静的ヤング率の計測値を、式 [3.46] を用いてせん断剛性率に変換し (G_s^*)、 G_d との比較を行った。ここで、変換に用いた各パラメータ (ν, a, m, E_h) は、4.4.1 で示した値を設定している。

図 4.4.27~4.4.30 に、圧密過程における各試料の静的剛性と動的剛性の比 ($E_s/E_d, E_s/E_d^*, G_s^*/G_d$) を示す。また、各試料の最終圧密応力 σ'_{cl} における静的剛性と動的剛性の比の平均値を表 4.4.5 にまとめた。なお、動的ヤング率 E_d について、加速度計取付け方法の改良前後で、その結果が大きく異なることを既に示したが、ここで示す実験結果の平均値については、利根川砂試料では取り付け方法改良前のデータを基に示した。それ以外の試料については、改良後の値の平均を用いている。

結果より、全体的に静的剛性は動的剛性よりも低い値となっており、江戸川砂 A 試料の一部試料を除いて、両者の比 ($E_s/E_d, E_s/E_d^*, G_s^*/G_d$) に関する応力状態依存性は認められない。また、凍結試料と再構成試料の違い、および凍結試料の融解拘束圧の影響についても、有意な傾向は認められなかった。

しかし、試料の違いにより静的剛性と動的剛性に比に多少の差が認められる。ヤング率については、利根川砂では $E_s/E_d = 0.4 \sim 0.6$ 程度であったが、江戸川砂 A, B, C 試料では $E_s/E_d = 0.2 \sim 0.4$ 程度を示し、かなり低い値となっている。これは、加速度計取付け方法の違いの影響が表れているといえる。また、動的ヤング率については、前節で述べたように、通常の E_d に加えて排水条件を考慮した E_d^* についても検討している。このヤング率の変換により、 E_d^* の値は E_d より 10~20 % 程度低減されているため、静的ヤング率 E_s との比は当然 E_d^* で整理した場合の方が大きくなる。しかし、実験結果に示されるように、動的ヤング率は静的ヤング率よりもかなり大きいことから、 E_s/E_d と E_s/E_d^* の差は比較的小さい。

せん断剛性率については、江戸川砂 C 試料において、 $G_s^*/G_d = 0.6$ 程度となるものの、その他の試料では $G_s^*/G_d = 0.7 \sim 0.8$ 以上の値となった。特に江戸川砂 B 凍結試料の最終圧密応力 ($\sigma'_{cf} = 100$ kPa) での比較では、静的剛性と動的剛性の差はほとんど生じていない。しかし、最終圧密応力に至るまでの圧密過程においては $G_s^*/G_d = 0.6 \sim 0.8$ 程度となっている。

このように、動的剛性が静的剛性よりも大きくなる傾向は、従来の研究 (e.g. Yamashita et al. 2003) でも報告されている。前章 3.6 でも触れたように、土粒子構造が一樣でない供試体を通過する弾性波は、構造の安定した (硬い) 部分を通過し、その代表値として動的剛性が得られるのに対し、静的剛性は供試体全体の变形特性を示すことが原因の一つであると考えられる。

また、本研究では、予備試験において動的微小変形特性に及ぼす入力周波数の影響は小さいことを前章 3.3 にて示した。しかし、粒状体を伝播する波動は、その粒径と波長の影響を受けることが指摘されており（Santamarina, 2001）、その影響を受けた動的剛性と静的剛性の関係は一義的な関係にあることが実験的にも確認されている（e.g. AnhDan et al.(2002), Maqbool, (2005)）。ここでは、各試料の代表的な試料を用い、既往の実験結果と比較した。

各試料の最終圧密応力状態において計測した P 波、および S 波の波形から得られるパラメータを表 4.4.6 に、代表的な波形形状を図 4.4.31 に示す。これらの試料の平均粒径 D_{50} と波長 λ の関係に対する、静的剛性と動的剛性計測時の速度の比 R （下式参照）について、既往の研究結果（e.g. Wicaksono, 2007）に、本研究の結果を重ねてプロットした。

$$R_s = V_{s(static)} / V_{s(dynamic)} = \sqrt{G_s / G_d} \quad [4.3]$$

$$R_p = V_{p(static)} / V_{p(dynamic)} = \sqrt{E_s / E_d} \quad [4.4]$$

S 波速度について比較した結果を図 4.4.32 に示す。本研究で用いた試料の結果は、全体的に既往の研究結果のばらつきの範囲に分布している。しかし、各試料の粒度分布は比較的似通っているため、図 4.4.32 においてプロットされた範囲は非常に限られており、試料の密度や平均粒径が結果に及ぼす影響は明確に現れていない。

また、表 4.4.6 に示すように、 P 波速度に関する静的と動的の比 R_p は、 S 波速度の比 R_s と比較して非常に小さくなっている。これは、 P 波の動的計測を飽和試料で実施した場合、土粒子骨格よりも早く P 波伝える間隙水の存在が影響していると考えられ、結果として静的測定時と比較して過大な P 波速度が得られたものと推定される。

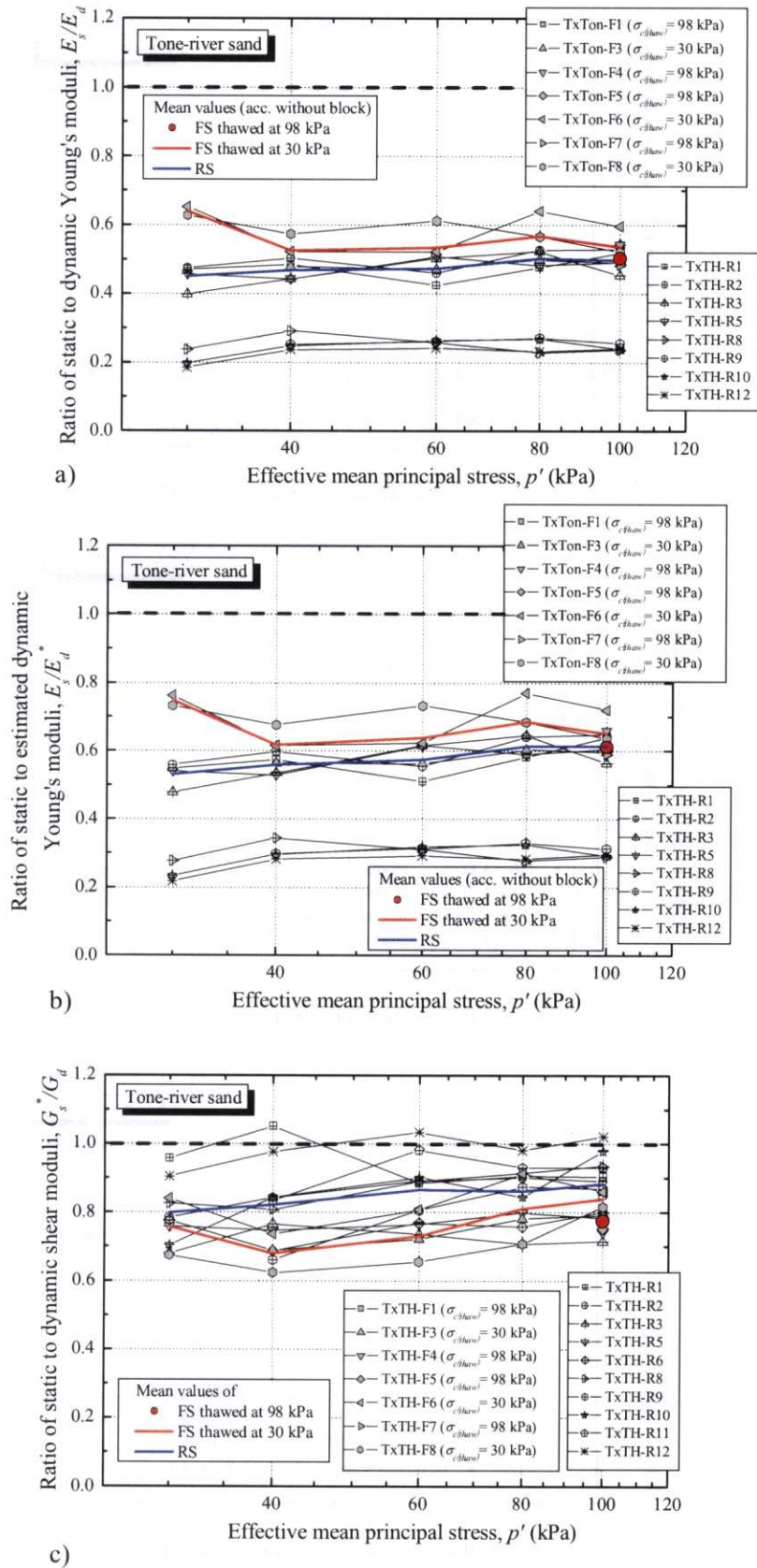


図 4.4.27 利根川砂試料における静的・動的剛性の比較

a) E_s/E_d b) E_s/E_d^* c) G_s^*/G_d

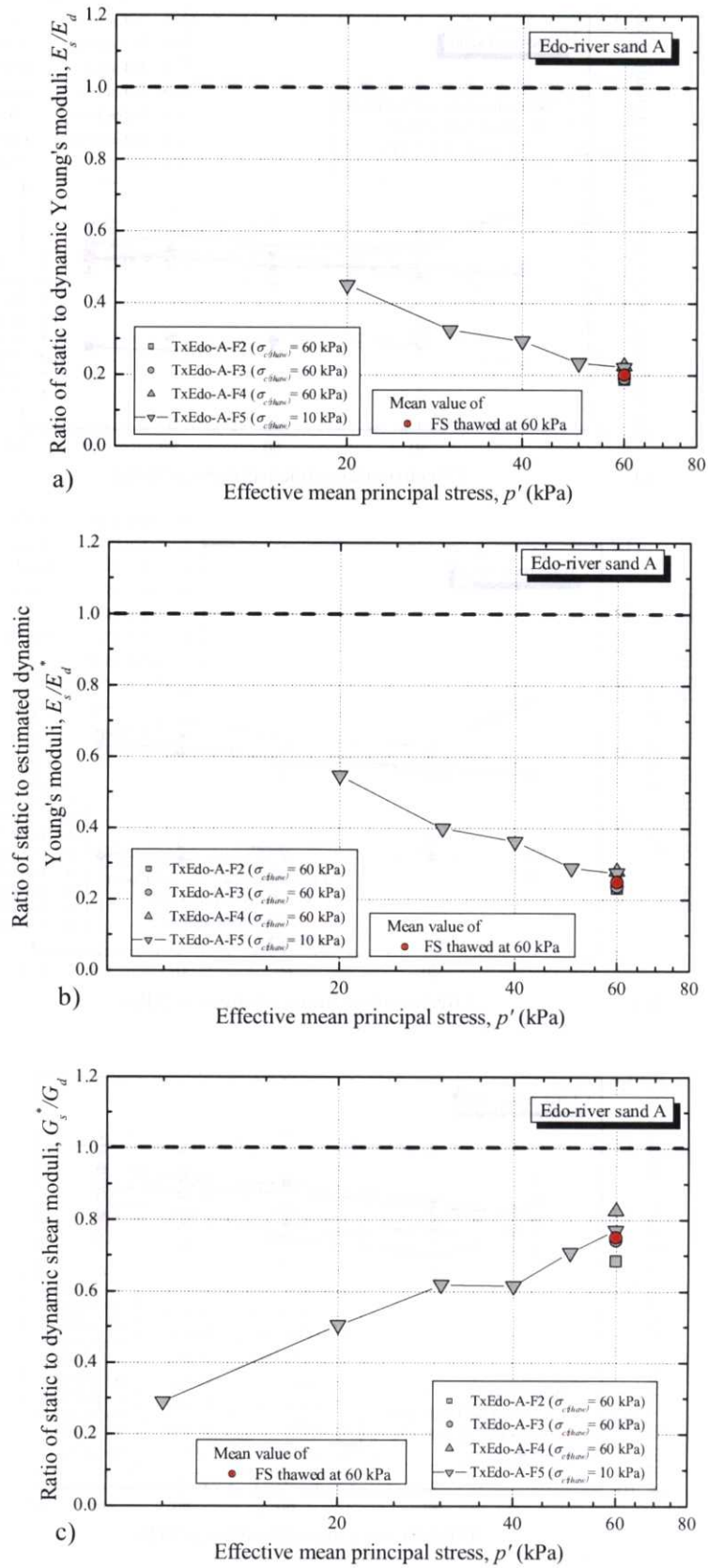


図 4.4.28 江戸川砂 A 試料における静的・動的剛性の比較

a) E_s/E_d b) E_s^*/E_d c) G_s^*/G_d

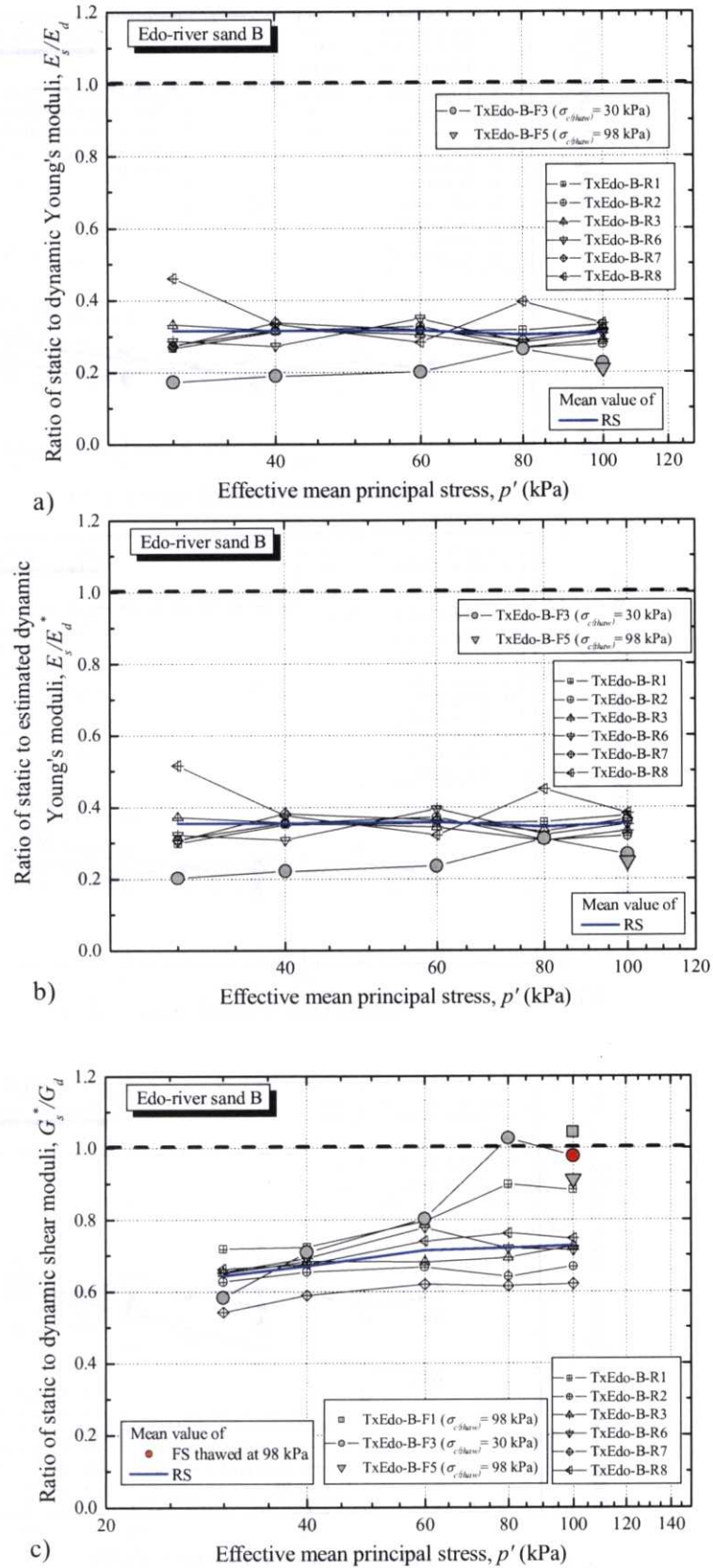


図 4.4.29 江戸川砂 B 試料における静的・動的剛性の比較

a) E_s/E_d b) E_s/E_d^* c) G_s^*/G_d

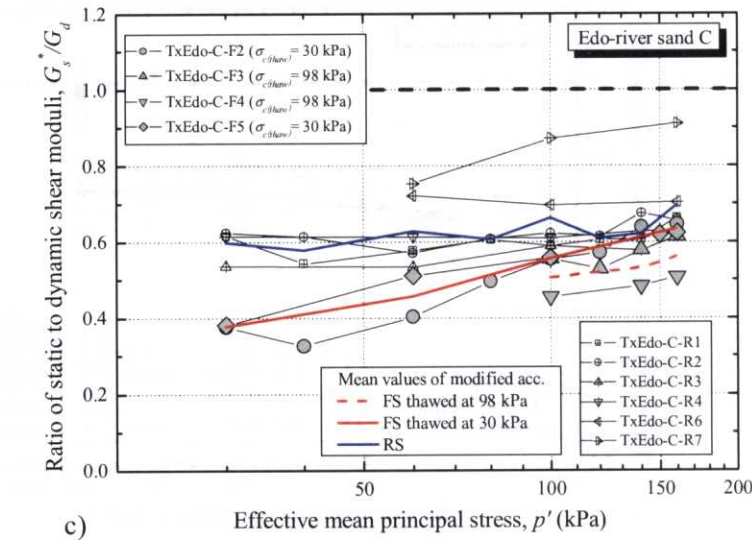
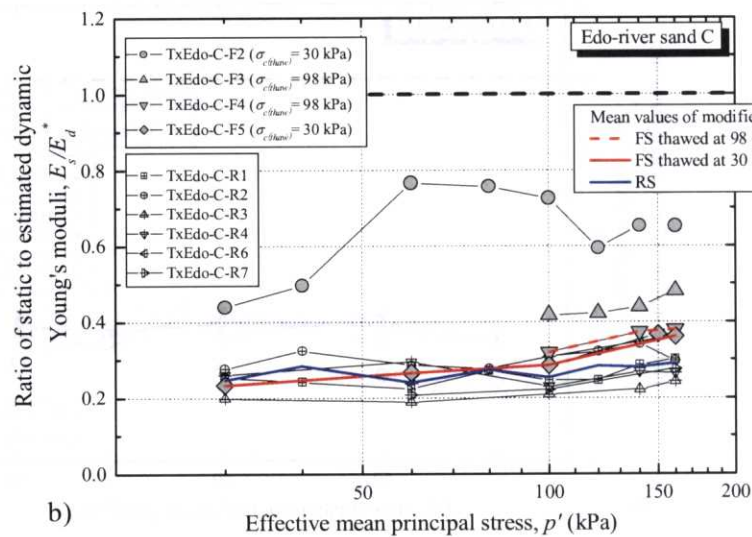
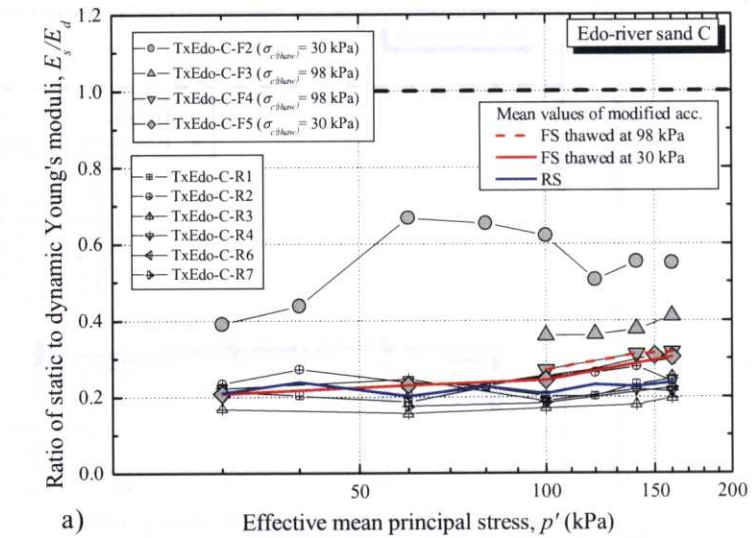


図 4.4.30 江戸川砂 C 試料における静的・動的剛性の比較

a) E_s/E_d b) E_s/E_d^* c) G_s^*/G_d

表 4.4.5 各試料の最終圧密応力における静的剛性と動的剛性の比

試料名	試料の種類	$\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	σ'_{cl} (kPa)	E_s/E_d	E_s/E_d^*	G_s^*/G_d
利根川砂*	凍結試料	98	100	0.50	0.61	0.77
		30	100	0.54	0.65	0.84
	再構成試料	-	100	0.50	0.61	0.82
江戸川砂 A	凍結試料	60	60	0.20	0.25	0.75
		10	60	0.22	0.27	0.77
江戸川砂 B	凍結試料	98	100	0.21	0.25	0.98
		30	100	0.23	0.27	0.98
	再構成試料	-	100	0.31	0.35	0.73
江戸川砂 C	凍結試料	98	160	0.32	0.38	0.56
		30	160	0.30	0.36	0.63
	再構成試料	-	160	0.24	0.29	0.70

*: 加速度計取付け方法改良前の実験結果

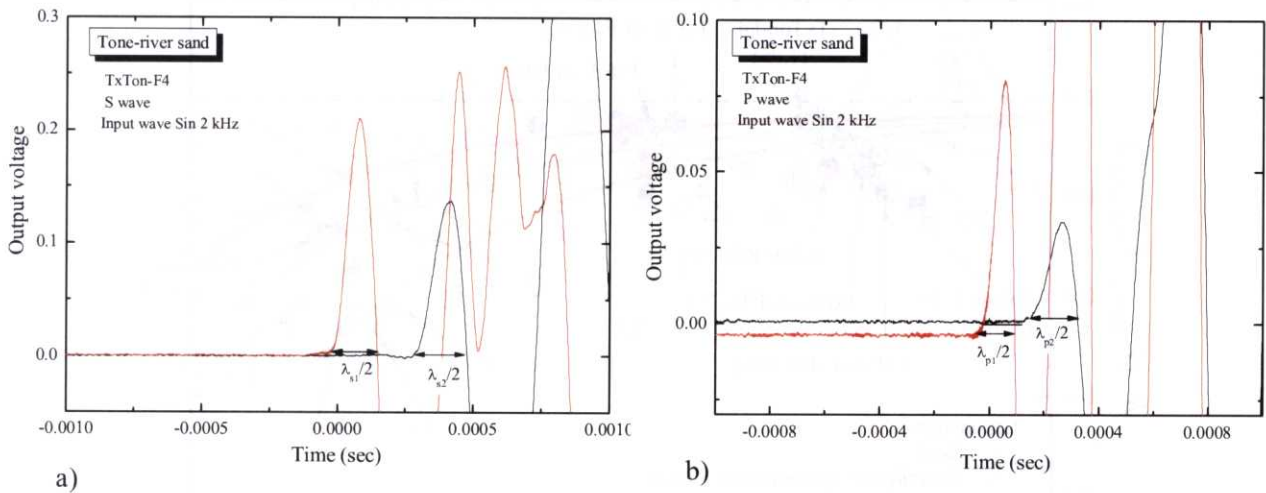


図 4.4.31 a) S波、b) P波計測時における加速度計受信波の波長

表 4.4.6 最終圧密応力における動的計測時の波長および弾性波速度（静的・動的）の比

試料名	供試体	D_{50} (mm)	R_s	$\lambda_{s1}/2, \lambda_{s2}/2$ (Mean value)	R_p	$\lambda_{p1}/2, \lambda_{p2}/2$ (Mean value)
利根川砂*	凍結試料 TxTon-F4	0.188	0.862	0.0403, 0.0460 (0.0432)	0.737	0.0571, 0.0782 (0.0676)
	再構成試料 TxTon-R1	0.188	0.951	0.0358, 0.0371 (0.0365)	0.721	0.0505, 0.0691 (0.0598)
江戸川砂 A	凍結試料 TxEdo-A-F3	0.110	0.861	0.0338, 0.0302 (0.0320)	0.437	0.0730, 0.1036 (0.0881)
江戸川砂 B	凍結試料 TxEdo-B-F5	0.561	0.955	0.0469, 0.0474 (0.0471)	0.458	0.1138, 0.1655 (0.1396)
	再構成試料 TxEdo-B-R1	0.561	0.940	0.0373, 0.0407 (0.0390)	0.576	0.1018, 0.1294 (0.1156)
江戸川砂 C	凍結試料 TxEdo-C-F3	0.189	0.783	0.0802, 0.0737 (0.0769)	0.641	0.1431, 0.1424 (0.1427)
	再構成試料 TxEdo-C-R2	0.189	0.811	0.0644, 0.0624 (0.0634)	0.490	0.1582, 0.1687 (0.1635)

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

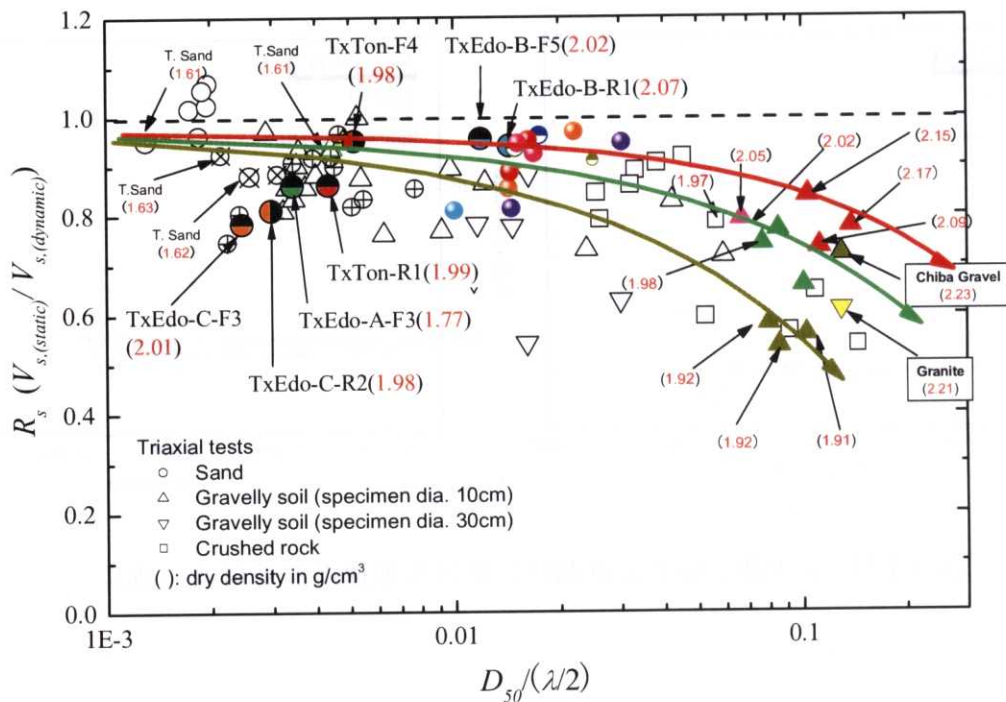


図 4.4.32 静的・動的計測による S 波速度の比に及ぼす供試体密度と受信波長の影響
(Wicaksono, 2007 に加筆)

4.5 再構成試料の微小変形特性に及ぼす応力履歴の影響

凍結試料と再構成試料の等方圧密過程における微小変形特性の違いを 4.4 で示した。その結果、基本的に凍結採取試料の方が再構成試料よりも高い微小変形特性を示し、その差は沖積層よりも洪積層の方が、また同じ洪積層でも堆積年代の古い方が大きくなる傾向が認められた。このような現象は、供試体の密度だけでは説明できない。考えられる影響としては、凍結試料の有するセメンテーション効果や土粒子構造の安定性に起因する、いわゆる「年代効果」の違い等が考えられるが、その定量的な評価を行うことは非常に困難である。

ここで、自然地盤の有する「年代効果」について考えてみる。

砂地盤の堆積環境と年代を考慮して順序立てると、年代効果のメカニズムは、①自然堆積、②応力履歴（地下水位変動、地震外力、地形改変等）による土粒子構造の安定化、③続成作用に伴う膠着物質の発達（セメンテーション）のように、年代と共に地盤の固結度が増加していく過程であると考えられる。また、これらの年代効果を室内土質試験で再現するためには、表 4.5.1 に示すように、密度調整と応力履歴を組み合わせる手法が考えられる。

本研究では、等方圧密後の再構成試料に繰返しせん断履歴や等方クリープ履歴を与えることで、「土粒子構造の安定化」による年代効果を擬似的に再現し、微小変形特性との関連性について検討した。このような応力履歴と微小変形特性の関係については Tokimatsu et al. (1986)や Koseki & Ohta (2001)でも報告されている。なお、洪積層のようなセメンテーションを有する地盤を表現するためには、応力履歴に加えて膠着物質の発達を表現する工夫を施す必要があるかもしれない。例えば、Koseki & Ohta (2001)は豊浦砂にベントナイトを加えて過圧密クリープによるセメンテーション効果を検討しているが、本研究では再構成試料に添加物は加えず、応力履歴のみによって各試料の年代効果の再現を試みた。

表 4.5.1 再構成試料による各地層の年代効果再現方法

地層と年代		年代効果の影響	年代効果再現方法
埋立地盤	～数百年	① (+ ②)	密度調整 (+ 応力履歴)
沖積層	～約 1 万年	① + ②	密度調整 + 応力履歴
洪積層	～約 200 万年	① + ② + ③	密度調整 + 応力履歴 + ???

①自然体積、②土粒子構造の安定化、③セメンテーション

4.5.1 応力履歴に伴う体積変化

微小変形特性は、基本的に供試体密度に依存することが知られていることから、ここでは繰返しせん断、および等方排水クリープに伴う供試体の体積変化についてまとめる。

なお、ここで述べる繰返しせん断とは、等方圧密後に実施した、軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)} = 0.1\%$ の排水繰返し載荷を指す。

従来、このような排水せん断履歴を供試体に与えることにより、履歴のない再構成試料よりも高い液状化強度を得る試みは多く実施されている。例えば Goto (1993) は、豊浦砂に対し、等方応力状態 ($p' = 98 \text{ kPa}$) において $\varepsilon_{v(DA)} = 0.1\%$ の繰返しせん断を一万回与えることで、液状化強度が著しく上昇することを確認し、その繰返しせん断による供試体の体積変化は相対密度 Dr 換算で 2% 程度であることを示した。参考までに、本研究でも豊浦砂を用い、 $p' = 100 \text{ kPa}$ において一万回の繰返しせん断を与えた場合の体積変化を計測したが、最終的な体積ひずみ ε_{vol} は 0.2% 程度、相対密度 Dr 換算で約 1% 程度であった。この結果を図 4.5.1 に示すが、繰返しに伴う体積変化の大部分は繰返し載荷開始直後に発生している。また、図中の体積ひずみは、約 0.1% 程度の幅を持って推移しているが、これは繰返しに伴う間隙水の出入りにより生じているものである (体積換算で 200 mm^3 程度)。

繰返しせん断に伴う体積変化の代表的な例として、利根川砂試料において一万回、もしくは二万回の繰返し載荷を与えた結果を図 4.5.2 に示す。繰返し載荷中の体積ひずみ ε_{vol} の増加傾向はそれぞれ異なっているが、体積変化の大部分は上述の豊浦砂と同様、せん断開始直後に発生しており、その増分は時間と共に減少する。繰返しせん断に伴う最終的な体積変化は、一万回の載荷では $\varepsilon_{vol} = 0.3\%$ 程度、二万回の載荷では $\varepsilon_{vol} = 0.6\%$ 程度となっており、全体に及ぼす影響は非常に小さい。

また、今回利根川砂試料においては、110 時間 (約 4.5 日) の等方排水クリープを実施した。この等方排水クリープは、所定応力 ($p' = 100 \text{ kPa}$) まで等方圧密後、そのまま応力状態を一定に制御している ($OCR = 1.0$)。しかし、図 4.5.3 に示すように、等方排水クリープによる体積変化はほとんど生じていない。これは、利根川砂試料には細粒分がほとんど含まれていないことや、土粒子骨格自体の強度が拘束圧に対して高く、かつクリープ載荷に対し相対的に移動しにくい角ばった粒子形状 (飯島 (2002) の顕微鏡観察より) であったことが推定できる。

上記の利根川砂試料に加え、本研究ではその他の試料 (江戸川砂 B, C) 試料においても、再構成試料に応力履歴を与えている。しかし、江戸川砂 C 試料の繰返し載荷時 (一万&二万回) の体積変化を図 4.5.4 に示すが、利根川砂と比較して非常に大きな体積変化が生じ ($\varepsilon_{vol} = 8\%$ 以上)、かつ測定値はかなりばらつく傾向が認められた。この原因としては、利根川砂では応力履歴を与えている間セル内を水で満たしていたのに対し、その他の試料ではセル水を用いなかったため、メンブレンを通して空気が入り込んだことが原因と考えられる。セル水を用いなかった理由は、メンブレン表面に設置した加速度計の防水効果を憂慮したためである。供試体の

体積変化（密度変化）は、供試体の状態を表す指標となるだけでなく、動的微小変形特性の値にも影響を与える。そこで本研究では、江戸川砂 B, C 試料における応力履歴による体積変化量は、履歴を与えた後マニュアルで計測した供試体の寸法を基にして設定した。

本研究にて計測された応力履歴に伴う再構成試料の体積変化を表 4.5.2 にまとめた。繰返しせん断に伴う体積変化量は、それぞれの試料において比較的まとまった値を示しており、利根川砂試料では $\varepsilon_{vol} = 0.2 \sim 0.6$ %程度、江戸川砂 B 試料では $\varepsilon_{vol} = 1.0 \sim 1.3$ %程度、江戸川砂 C 試料では $\varepsilon_{vol} = 3.1 \sim 3.2$ %程度となっている。また、TxEdo-C-R5（江戸川砂 C 試料）は、乾燥状態にて $p' = 160$ kPa まで等方圧密後、 $p' = 60$ kPa まで除荷し、繰返しせん断を二万回与えたものであるが、体積変化は $\varepsilon_{vol} = 0.04$ %とかなり小さな値となっている。豊浦砂の結果も含めた全体的な傾向として、細粒分含有率が高いほど、また繰返し載荷時の有効拘束圧が高いほど、体積ひずみ ε_{vol} は大きくなるといえる。また、繰返し載荷回数が多いほど ε_{vol} の値も大きくなるが、繰返し回数が一万回と二万回との比較では大きな差は生じていない。TxEdo-C-R8（江戸川砂 C 試料）では、同一供試体において、繰返し載荷が一万回、および二万回に達した時の供試体寸法をマニュアルで計測しているが、その差は僅かであることが確認された。

等方排水クリーブ履歴については、本研究の計測期間では顕著な体積変化は生じなかった。しかし、絶対値は小さいものの、江戸川砂 C 試料の方が利根川砂試料より大きな体積変化が生じている。これは、繰返しせん断履歴と同様、細粒分含有率と等方排水クリーブ時の有効拘束圧の違いによるものと推定される。

なお、江戸川砂 C 試料の一部供試体（TxEdo-C-R2, R3）においては、マニュアルで応力履歴後の供試体寸法を計測していない。これらの値を補完するため、今回は同じ履歴を与えた他の供試体（同一試料）の体積ひずみ ε_{vol} の平均値を用いて設定した。

江戸川砂 B, C 試料では、応力履歴を与えた結果として、供試体の飽和度がかなり低下したことになる。本研究ではこれらの試料を用いて、更なる実験（微小変形特性の計測・液状化試験）を実施したが、応力履歴により飽和度が低下した試料については、二重負圧法により再飽和を実施している。

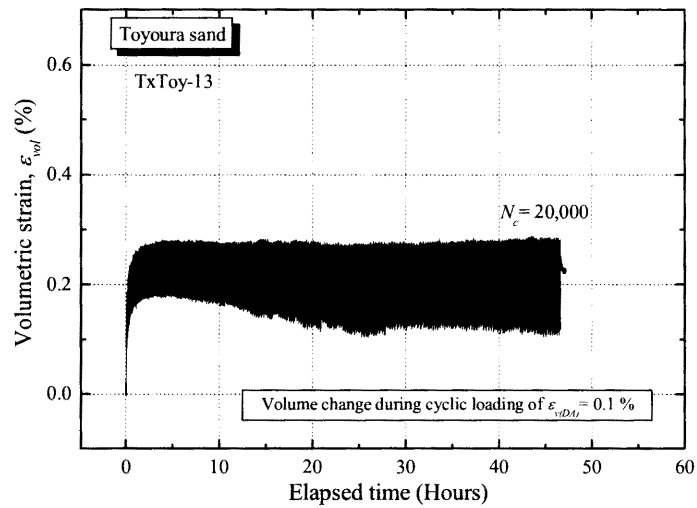


図 4.5.1 繰返しせん断（二万回）に伴う体積ひずみ時刻歴（豊浦砂）

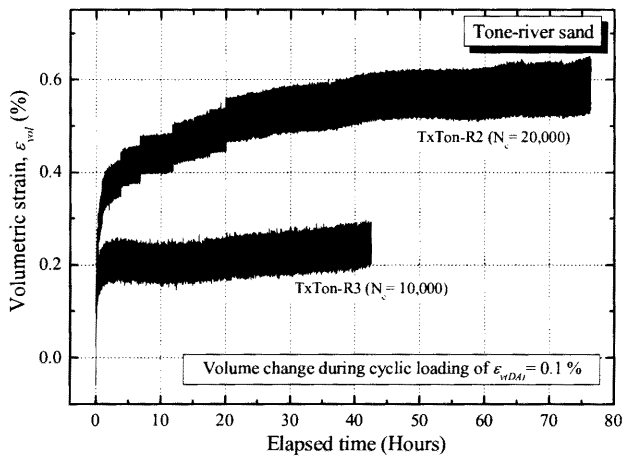


図 4.5.2 繰返しせん断（一万 or 二万回）に伴う体積ひずみ時刻歴（利根川砂試料）

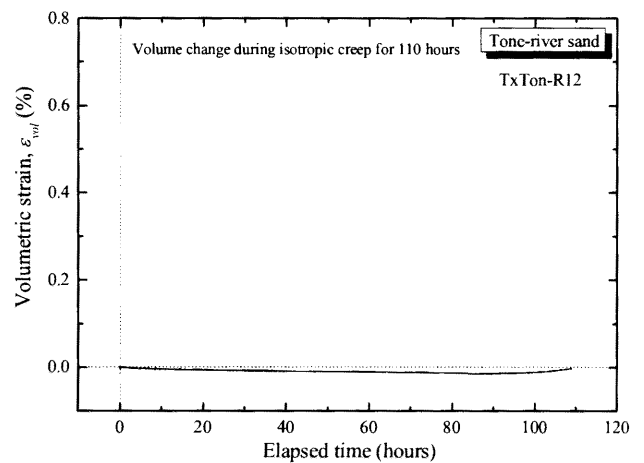


図 4.5.3 等方排水クリープ（110時間）に伴う体積ひずみ時刻歴（利根川砂試料）

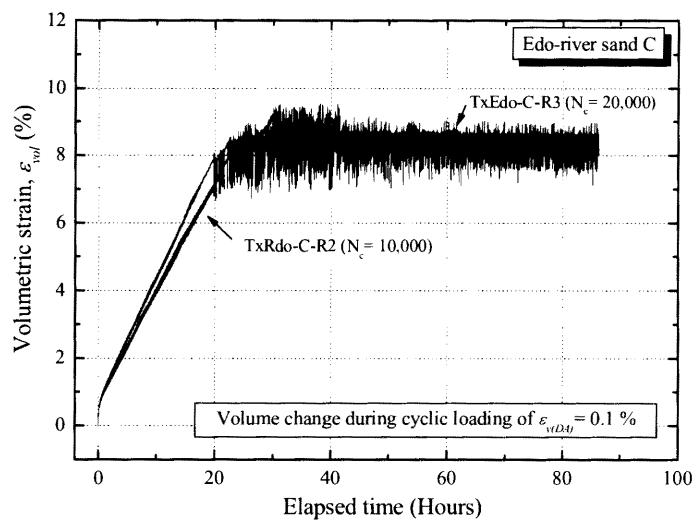


図 4.5.4 繰返しせん断（一万 or 二万回）に伴う体積ひずみ時刻歴（江戸川砂 C 試料）

表4.5.2 応力履歴に伴う供試体体積変化

試料名 (Fc)	供試体 No.	履歴時 有効拘束圧 σ'_c (kPa)	応力履歴	履歴による 体積ひずみ ϵ_{vol}	備考
利根川砂 (1.2 %)	TxTon-R2	100	CL: 20,000 回	0.636	LCDPT
	TxTon-R3	100	CL: 10,000 回	0.266	LCDPT
	TxTon-R6	100	CL: 10,000 回	0.551	LCDPT
	TxTon-R7	100	CL: 10,000 回	0.237	LCDPT
	TxTon-R8	100	CL: 10,000 回	0.516	LCDPT
	TxTon-R9	100	CL: 10,000 回	0.534	LCDPT
	TxTon-R10	100	CL: 10,000 回	0.551	LCDPT
	TxTon-R12	100	C: 110 時間	0.006	LCDPT
江戸川砂 B (3.0 %)	TxEdo-B-R7	100	CL: 10,000 回	0.980	Manual
	TxEdo-B-R8	100	CL: 20,000 回	1.346	Manual
	TxEdo-B-R10	100	CL: 20,000 回	1.037	Manual
江戸川砂 C (2.9 %)	TxEdo-C-R2	160	CL: 10,000 回	3.110*	TxEdo-C-R8
	TxEdo-C-R3	160	CL: 20,000 回	3.265*	TxEdo-C-R8, R10
	TxEdo-C-R4	160	C: 210 時間	0.242	Manual
	TxEdo-C-R5	60+	CL: 20,000 回	0.040	Manual
	TxEdo-C-R8	160	CL: 10,000 回	3.110	Manual
			CL: 20,000 回	3.380	
TxEdo-C-R10	160	CL: 20,000 回	3.150	Manual	
豊浦砂 (0.2 %)	TxToy-13	100	CL: 20,000 回	0.200	LCDPT

応力履歴：CL（繰り返しせん断）、C（等方排水クリープ）

備考欄：LCDPT（体積ひずみを低差圧計で計測）、Manual（手動計測）

＋：乾燥状態で $p' = 160$ kPaまで等方圧密後、 $p' = 60$ kPaまで除荷し、せん断履歴を付与

*：備考欄のデータの平均値を採用

4.5.2 応力履歴と微小変形特性

再構成試料の微小変形特性に及ぼす繰返しせん断履歴または等方排水クリープ履歴の影響は、これまでの研究でも確認されている (e.g. Tokimatsu et al., 1986)。微小変形特性の変化は、応力履歴に伴う体積変化 (密度の上昇) によっても生じるが、土粒子構造の変化によっても生じる可能性がある。ここでは、これらの応力履歴を与える前後の微小変形特性について実験結果を示す。

利根川砂試料、および江戸川砂 B, C 試料の再構成試料に対する繰返しせん断、および等方排水クリープ履歴を与える前後の微小変形特性を表 4.5.3 に示す。なお表中では、計測された微小変形特性 (上段) と間隙比関数 (式[4.1]) により補正された値 (下段) を記している。

全体的に、繰返しせん断履歴により、微小変形特性は大幅に上昇している。また、微小変形特性を間隙比関数で補正した値も上昇する傾向が認められることから、応力履歴による微小変形特性の増加は密度変化の影響ではなく、土粒子構造の安定化によるものと考えられる。

図 4.5.5~ 4.5.7 に応力履歴による体積ひずみ ε_{vol} と、各微小変形特性の増加率を示す。等方クリープ履歴では、体積ひずみは比較的小さく、微小変形特性の増加もほとんど認められなかった。一方、繰返しせん断履歴では、10~30%程度の微小変形特性の増加が認められた。しかし、全体的に応力履歴による体積ひずみ ε_{vol} と微小変形特性の増加率に明確な関係は得られなかった。また、静的ヤング率 E_s と動的せん断剛性率 G_d の結果と比較して、動的ヤング率 E_d の結果はばらつきが大きく生じている。

飯島(2002) は、初期繰返しせん断回数と応力振幅、および微小変形特性の変化を実験により求めているが、繰返し回数が多いほど、応力振幅が大きいほど剛性の増分は大きくなると報告している。本研究では、繰返し回数は 10,000 回もしくは 20,000 回実施しているが、繰返し回数と微小変形特性の増加率にはある程度対応が認められ、特に動的せん断剛性率 G_d に関しては、全体的に良い相関が得られている。

また、江戸川砂 C 試料の TxEdo-C-R5 では、 $p' = 160$ kPa から $p' = 60$ kPa まで除荷後、20,000 回の繰返しせん断履歴を与え、 $p' = 160$ kPa まで再圧密して微小変形特性を計測している。しかし、再圧密後の静的ヤング率 E_s は、繰返しせん断履歴前の値と比較して低下している。また、動的せん断剛性率 G_d は若干の上昇が認められるが、 $p' = 160$ kPa にて繰返しせん断履歴を与えられた他の供試体と比較して、その増加率は低くなっている。これは、低い応力状態での応力履歴はその後の等方圧密によりその効果が失われることを意味している。なお、TxEdo-C-R5 の繰返しせん断履歴後の動的ヤング率 E_d は 2 倍以上の増加となっているが、これは繰返しせん断履歴を与える前の微小変形特性は乾燥状態であったのに対し、履歴後は飽和状態で計測されていることから、間隙水の影響によるものと考えられる。

本研究の実験では、排水繰返し载荷履歴により微小変形特性の増加傾向が認められたが、同様の実験を実施した Teachavorasinskun et al. (1994)は、繰返し载荷を 10 万回実施しても静的ヤング率は変化しないと報告している。この原因の一つとして、本研究では繰返し载荷をひずみ振幅一定条件 ($\varepsilon_{v(DA)} = 0.1\%$) で実施しているのに対し、Teachavorasinskun et al. (1994)は $\varepsilon_{v(SA)} = 0.1\%$ に相当する一定応力振幅を与えていることが考えられる。図 4.5.8 に本研究における繰返し载荷の初期段階と最終段階の応力-ひずみ関係を示すが、ひずみ振幅一定条件の場合、繰返し回数とともに応力振幅は伸張側にシフトする傾向が認められる。繰返し载荷後の微小変形特性は等方応力状態で計測されていることから、本研究では応力振幅の圧縮側で計測していることになるのに対し、応力振幅一定で実験を実施した Teachavorasinskun et al. (1994)は、応力振幅の中心で計測していたものと考えられる。応力振幅と微小変形特性の計測点の関係が、その結果に及ぼす影響は、Hoque (1996)によっても確認されており、圧縮側では伸張側よりも高い微小変形特性が得られると報告されている。本研究と Teachavorasinskun et al. (1994)の結果の差についても、このような繰返し载荷条件の違いにより説明できる可能性は十分考えられる。

しかし、参考までに応力振幅一定条件で 1 万回の繰返し载荷を行った結果と、载荷前後の微小変形特性の結果を図 4.5.9 に示すが、応力振幅一定条件でも微小変形特性の増加傾向が確認された。実験は一試料のみであるため、今後同様の実験を系統的に行う必要がある。

表 4.5.3 最終圧密応力における応力履歴を与える前後の微小変形特性の変化

	供試体 No.	応力履歴	履歴前後の E_s	履歴前後の E_d	履歴前後の G_d
			履歴前後の $E_s/f(e)$	履歴前後の $E_d/f(e)$	履歴前後の $G_d/f(e)$
利 根 川 砂	TxTon-R2*	CL: 20,000 回	-	304.1- 352.0 (1.16) 271.1-306.6 (1.13)	85.5- 134.8 (1.58) 76.2- 117.4 (1.54)
	TxTon-R3*	CL: 10,000 回	137.4- 178.8 (1.30) 115.0- 148.3 (1.29)	302.4- 329.8 (1.09) 253.3- 273.4 (1.08)	91.1- 112.3 (1.23) 76.3- 93.1 (1.22)
	TxTon-R6*	CL: 10,000 回	154.3- 202.7 (1.31) 119.6- 154.3 (1.29)	-	91.3- 113.2 (1.24) 70.8- 86.2 (1.22)
	TxTon-R7*	CL: 10,000 回	137.6- 179.9 (1.31) 110.4- 143.2 (1.30)	221.9- 328.2 (1.48) 178.0- 261.3 (1.47)	88.3- 114.0 (1.29) 70.8- 90.8 (1.28)
	TxTon-R8	CL: 10,000 回	168.7- 217.6 (1.29) 140.6- 178.2 (1.27)	712.4- 860.7 (1.21) 593.9- 705.0 (1.19)	85.6- 112.4 (1.31) 71.4- 92.1 (1.29)
	TxTon-R9	CL: 10,000 回	158.6- 189.6 (1.20) 141.5- 165.9 (1.17)	617.9- 1016.8(1.65) 551.1- 889.7 (1.61)	86.5- 105.6 (1.22) 77.2- 92.4 (1.20)
	TxTon-R10	CL: 10,000 回	166.8- 197.8 (1.19) 150.9- 175.4 (1.16)	697.9- 1166.5(1.67) 631.3- 1034.6(1.64)	80.8- 107.5 (1.33) 73.1- 95.4 (1.30)
	TxTon-R12	C: 110 時間	156.2- 169.0 (1.08) 135.1- 146.1 (1.08)	648.9- 671.1 (1.03) 561.1- 580.2 (1.03)	72.5- 73.8 (1.02) 62.7- 63.8 (1.02)
江 戸 川 砂 B	TxEdo-B-R7	CL: 10,000 回	152.7- 182.2 (1.19) 154.4- 177.0 (1.15)	478.8- 687.3 (1.44) 484.2- 667.9 (1.38)	95.4- 109.5 (1.15) 96.5- 106.4 (1.10)
	TxEdo-B-R8	CL: 20,000 回	164.6- 214.4 (1.30) 172.7- 213.4 (1.24)	490.7- 499.3 (1.02) 514.8- 496.9 (0.97)	85.5- 117.7 (1.38) 89.7- 117.2 (1.31)
	TxEdo-B-R10	CL: 20,000 回	-	620.9- 729.1 (1.17) 630.6- 709.7 (1.13)	92.3- 116.5 (1.26) 93.8- 113.4 (1.21)
江 戸 川 砂 C	TxEdo-C-R2	CL: 10,000 回	235.9- 360.5 (1.53) 203.3- 278.9 (1.37)	980.6- 1277.8(1.30) 845.1- 988.7 (1.17)	170.1- 218.0 (1.28) 146.5- 168.7 (1.15)
	TxEdo-C-R3	CL: 20,000 回	221.7- 293.7 (1.32) 197.8- 250.0 (1.26)	1130.8- 1162.8(1.02) 1008.7- 989.6 (0.98)	170.9- 223.0 (1.31) 152.5- 189.8 (1.24)
	TxEdo-C-R4	C: 210 時間	222.6- 262.6 (1.18) 204.9- 239.5 (1.17)	1038.6- 960.0 (0.92) 956.2- 875.5 (0.92)	167.1- 171.4 (1.03) 153.9- 156.3 (1.02)
	TxEdo-C-R5+	CL: 20,000 回	257.3- 218.2 (0.85) 236.9- 184.3 (0.78)	394.3- 915.4 (2.32) 363.0- 773.4 (2.13)	163.4- 181.3 (1.11) 150.4- 153.2 (1.02)
	TxEdo-C-R8	CL: 20,000 回	228.1- 314.0 (1.38) 235.3- 285.4 (1.21)	947.0- 1160.9 (1.23) 977.0- 1055.1 (1.08)	173.4- 220.8 (1.27) 178.9- 200.7 (1.12)
	TxEdo-C-R10	CL: 20,000 回	244.0- 396.1 (1.62) 207.0- 301.7 (1.46)	-	169.0- 244.9 (1.45) 143.4- 186.4 (1.30)
豊 浦 砂	TxToy-13	CL: 20,000 回	259.0- 299.0 (1.15) 184.2- 211.2 (1.15)	491.4- 597.8 (1.22) 349.5- 422.2 (1.21)	101.6- 135.7 (1.33) 72.3- 95.8 (1.33)

カッコ内は応力履歴による微小変形特性の増加率（応力履歴後/応力履歴前）

*：加速度計取付け方法改良前の実験結果

+：乾燥状態で $p' = 160$ kPaまで等方圧密後、 $p' = 60$ kPaまで除荷し、せん断履歴を付与

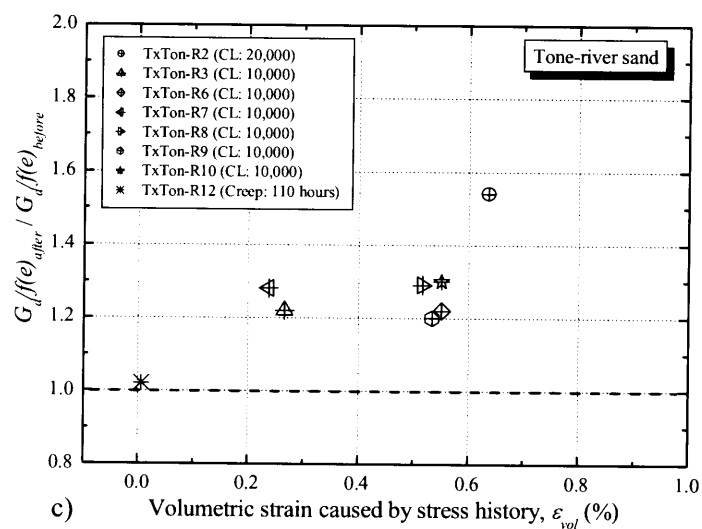
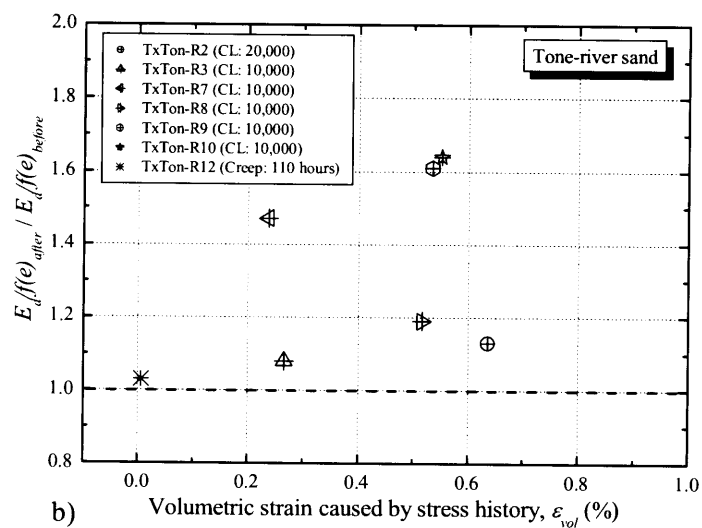
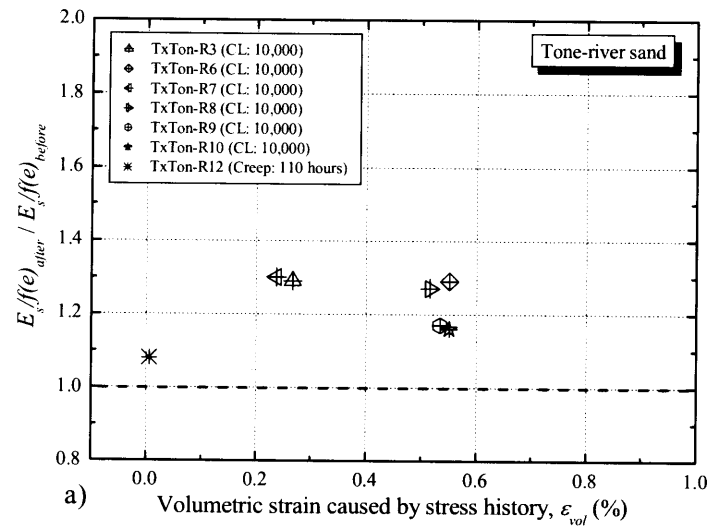


図 4.5.5 利根川砂試料の応力履歴による体積変化と微小変形特性の増加率の関係

a) E_s , b) E_d , c) G_d

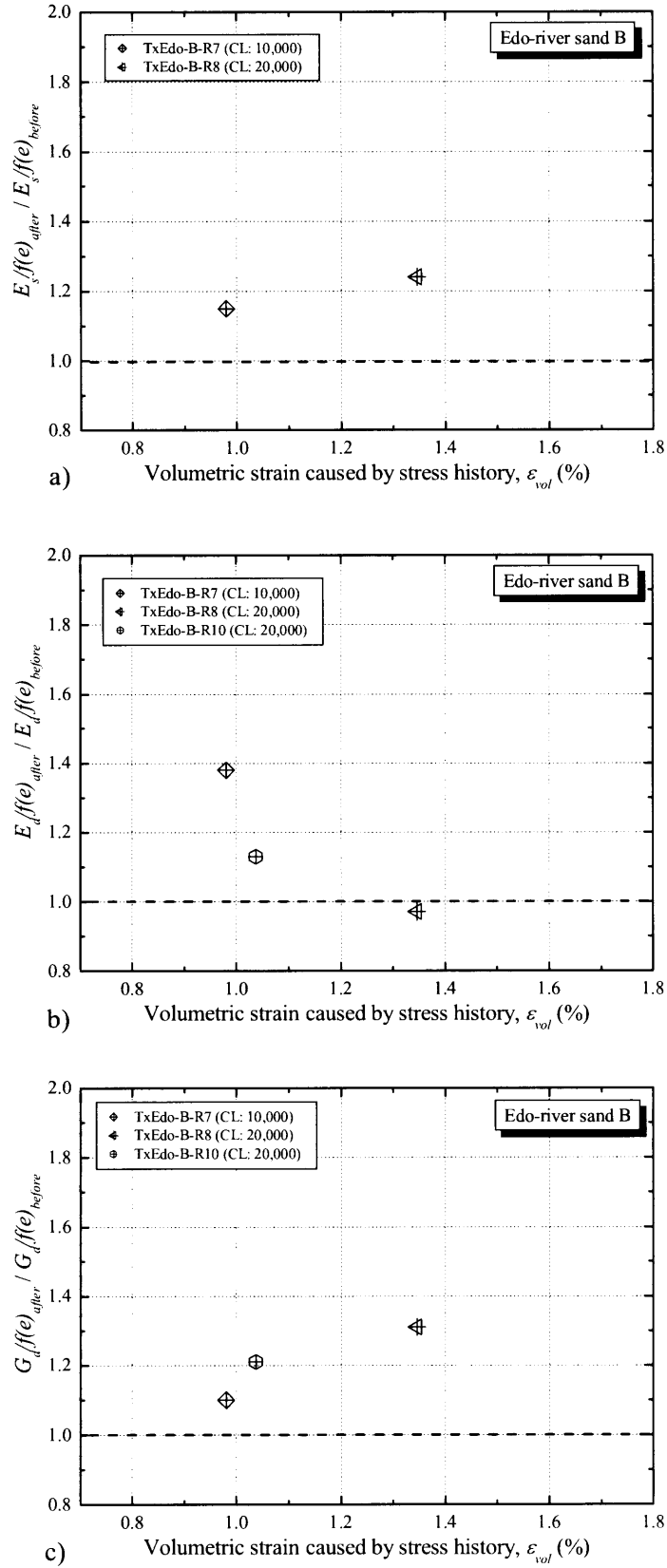


図 4.5.6 江戸川砂 B 試料の応力履歴による体積変化と微小変形特性の増加率の関係

a) E_s , b) E_d , c) G_d

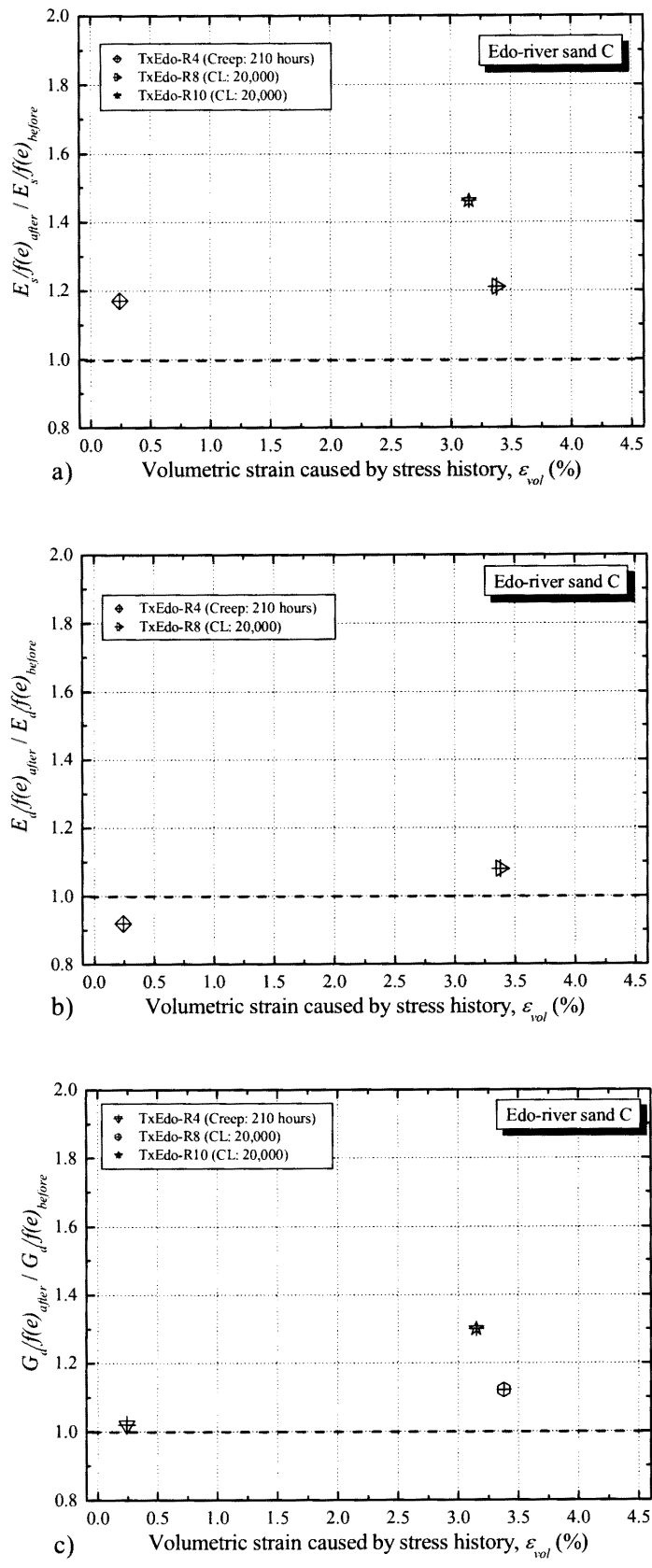


図 4.5.7 江戸川砂 C 試料の応力履歴による体積変化と微小変形特性の増加率の関係

a) E_s , b) E_d , c) G_d

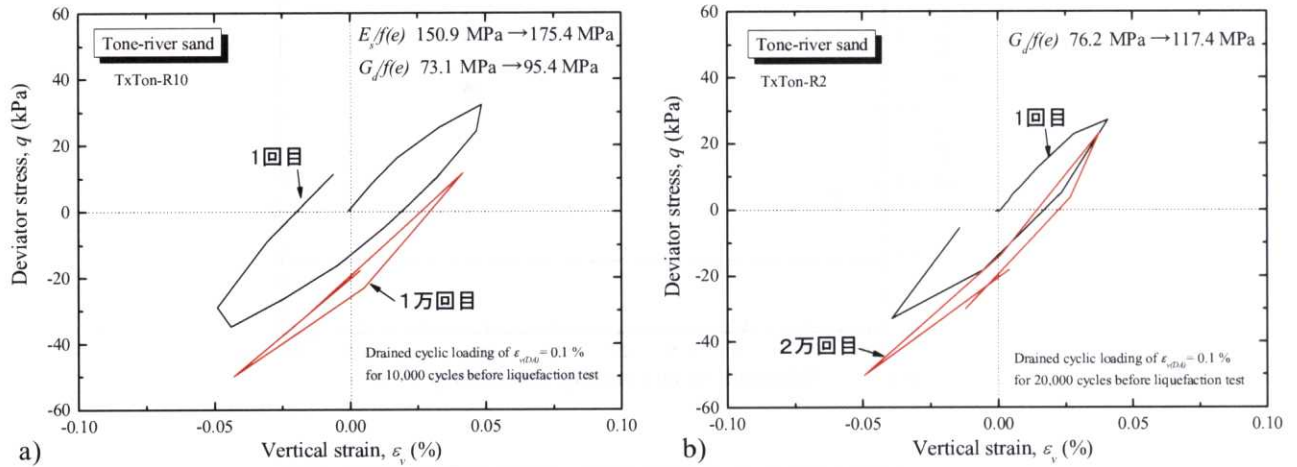


図 4.5.8 利根川砂試料の繰返し载荷履歴時（ひずみ振幅一定条件）における
 応力－ひずみ関係と履歴前後の微小変形特性の変化 a) 10,000 回, b) 20,000 回

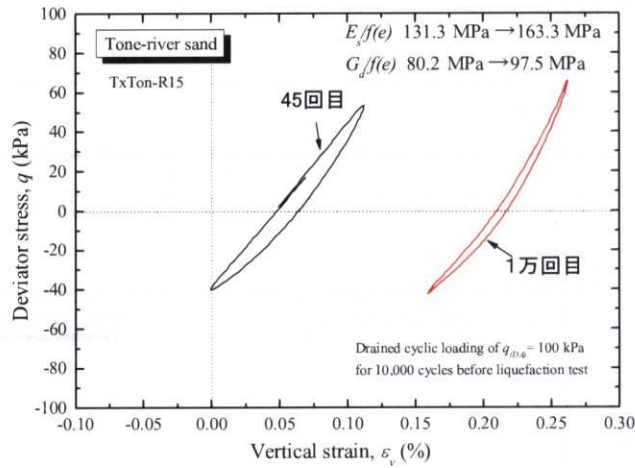


図 4.5.9 利根川砂試料の繰返し载荷履歴時（応力振幅一定条件, 10000 回）における
 応力－ひずみ関係と履歴前後の微小変形特性の変化

4.6 年代効果の定量的評価

凍結試料と再構成試料の微小変形特性の違いは年代効果の影響によるものと考えられるが、その年代効果の程度を定量的に求める手法は確立されていない。また、4.5では自然地盤の年代効果を、土粒子構造の安定化とセメンテーションのそれぞれの影響によるものと考察したが、両者の影響を区別して確認・評価することは非常に困難である。

そこで本研究では、凍結試料を各試料の原位置有効上載圧相当の拘束圧（負圧）で融解、飽和した後、拘束圧をゼロまで低下させて一軸圧縮試験を実施した。このような一軸圧縮試験により、堆積物の続成作用を定量的に把握する試みは、陶野（1975）によっても行われている。

表4.6.1および図4.6.1に各試料の一軸圧縮試験結果を示す。沖積層である利根川砂では拘束圧がゼロになった時点で供試体が液状化してしまった（写真4.6.1）。一方、洪積層である江戸川砂B, C試料については、それぞれ一軸圧縮強度 q_u として約20 kPa, 29 kPaが得られた。また、江戸川砂C試料については、繰返し載荷履歴を20,000回与えた再構成試料についても試験を実施したが、利根川砂と同様、拘束圧の低下に伴い供試体は液状化した。

利根川砂および江戸川砂B, C試料は、表4.6.1に示すように細粒分の少ない砂質土である。したがって、供試体を飽和してサクシジョンの効果が失われた場合、理論上拘束圧が無ければ供試体は自立することができない。これは砂が摩擦材料である以上、土粒子のかみ合わせにより構造が安定していたとしても同様である。しかし、土粒子間にセメンテーションが発達していた場合、供試体は自立可能となり、その効果に応じた一軸圧縮強度を発揮するものと考えられる。今回の各試料の一軸圧縮試験結果はこの傾向を明確に表しており、土粒子構造の安定化による年代効果しか持たない利根川砂や再構成試料では供試体は自立できず、セメンテーションが発達していたと考えられる江戸川砂B, C試料では一軸圧縮強度を得ることができた。

また、表4.6.1には、4.4にて示した凍結試料と応力履歴のない再構成試料の最終圧密応力状態における微小変形特性の比（凍結試料／再構成試料）を記している（ E_d を除く）。凍結試料と再構成試料の微小変形特性の差は、凍結試料の年代効果の影響を反映している可能性があることを既に述べたが、動的せん断剛性率 G_d は江戸川砂B, C試料の各一軸圧縮強度 q_u とよく対応している。また、江戸川砂B試料は段丘礫層より採取されたものであり、江戸川砂C試料はその基盤である下総層群より採取された試料である。したがって、同じ洪積層であっても、地質年代は江戸川砂C試料の方がはるかに古く、セメンテーション効果は比較的大きいものと推定される。したがって、微小変形特性（特に G_d ）と一軸圧縮強度はこれら洪積層同士の年代効果の違いも反映していると考えられ、特に一軸圧縮強度はセメンテーション効果の定量的評価に適用できる可能性がある。

なお、表4.6.1および図4.6.1に示すように、沖積層の江戸川砂A試料でも一軸強度が得られた。これは、江戸川砂A試料には細粒分が60 %以上も含まれており、粘性土の特性を有していたこ

とが原因であると考えられる。

表4.6.1 各試料の一軸圧縮試験結果

試料名	試料の種類	一軸圧縮強度 q_u (kPa)	微小変形特性の比 (凍結/再構成)	
			$E_{s(FS)} / E_{s(RS)}$	$G_{d(FS)} / G_{d(RS)}$
利根川砂	凍結	0	1.13	1.32
江戸川砂A	凍結	14.1	-	-
江戸川砂B	凍結	19.5	1.62	1.41
江戸川砂C	凍結	28.6	1.63	2.04
	再構成(20,000 CL)	0	1.37	1.38

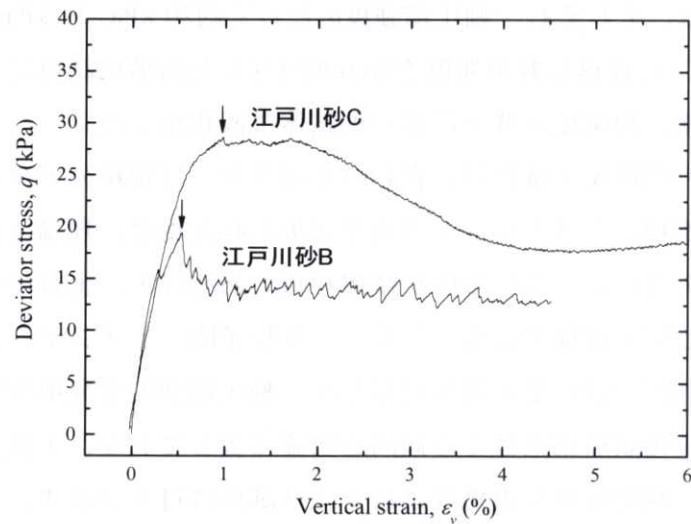


図4.6.1 洪積試料の一軸圧縮試験結果

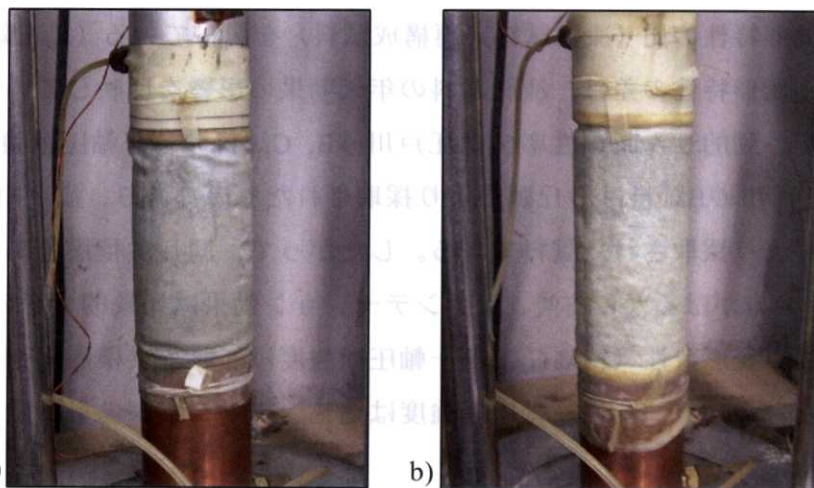


写真4.6.1 a) 利根川砂凍結試料、b) 江戸川砂C試料の有効拘束圧ゼロ時点の状況

4.7 再構成試料の微小変形特性に及ぼす凍結融解履歴の影響

凍結試料の融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ と融解時の体積ひずみ $\varepsilon_{vol(thaw)}$ の関係、および凍結試料の $\sigma_{c(thaw)}$ の違いがその後の等方圧密過程における微小変形特性に及ぼす影響を、それぞれ 4.2 および 4.4 において検討した。その結果、融解時の $\varepsilon_{vol(thaw)}$ は、 $\sigma_{c(thaw)}$ が高いほど大きくなる傾向が認められ、また試料により程度の差はあるが、 $\sigma_{c(thaw)}$ が大きいほど微小変形特性も大きくなることを実験的に示した。

これらの実験は、主に凍結融解履歴に伴う供試体の乱れの影響を検討する目的で行われたが、原位置での凍結時に経験した膨張ひずみを知ることはできない。ここでは、利根川砂の繰返しせん断履歴を 10,000 回与えた再構成試料を、有効拘束圧 98 kPa にて凍結させた後、凍結試料と同じく二通りの拘束圧 ($\sigma_{c(thaw)} = 98 \text{ kPa}$ or 30 kPa) で融解させ、凍結融解履歴に伴う体積ひずみ $\varepsilon_{vol(freeze)}$, $\varepsilon_{vol(thaw)}$ と、履歴前後の微小変形特性を比較した。

4.7.1 凍結融解履歴に伴う体積変化

図 4.7.1 に TxTon-R6 試料の凍結時ひずみと供試体表面温度の時刻歴を示す。また、図 4.7.2 には、同試料の高拘束圧 ($\sigma_{c(freeze)} = 98 \text{ kPa}$) での融解時ひずみと供試体表面温度の時刻歴を示す。更に、図 4.7.3 に TxTon-R8 試料の凍結時ひずみと低拘束圧 ($\sigma_{c(thaw)} = 30 \text{ kPa}$) での融解時ひずみの時刻歴を示す。各図に示したひずみは、軸ひずみ ε_v 、および供試体上・中・下部の側方ひずみ ε_h であり、計測手法は 4.3 において示した凍結試料の融解試験と同じである。

TxTon-R6 試料の側方凍結ひずみの時刻歴 (図 4.7.1 a)) では、凍結開始から収縮傾向を示し、約 1 時間後に収縮ひずみのピークが生じていることが確認された。4.3 において示した凍結試料の融解ひずみにおいても、融解収縮ひずみのピークが生じていたが、これは間隙水の密度 (体積) は摂氏 4℃ において最大 (最小) となることにより説明ができた。凍結時の供試体表面温度の時刻歴 (図 4.7.1 b)) によると、収縮ひずみのピーク時と同時に供試体表面温度が 4℃ となっていることから、この現象も水の密度と温度の関係を用いて説明が可能である。また、本研究の凍結試験では、デシケーター内の温度をできる限り低下させるため、液体窒素で満たした器をデシケーター内に設置し、定期的に液体窒素を補給している。しかし、TxTon-R6 試料では、凍結開始から約 2 時間後に液体窒素の補給を中断したため、その後供試体温度は -2.5℃ 程度から -1℃ 程度まで上昇している。図 4.7.1 a) において認められる凍結膨張ひずみのピークの原因はこの影響によるものと考えられる。一方、図 4.7.3 a) に示した TxTon-R8 試料の凍結ひずみ時刻歴には、ピーク等の有意な特徴は認められなかった。

なお、融解ひずみの時刻歴 (図 4.7.2, 図 4.7.3 b)) については、4.3 で示した凍結試料の傾向と良く似ており、やはり供試体表面温度が 4℃ となるタイミングで融解収縮ひずみのピークが生じている。

今回の実験による最終的な凍結・融解ひずみを表 4.7.1 に示す。なお、凍結ひずみについては、第 2 章において概説したように、デシケーター内でクーラント循環による凍結過程を経た後、供試体を三軸セルごと-20℃に保たれた冷凍室内に搬入し、完全に凍結した供試体の寸法を基に設定している。また、融解ひずみについては、4.3 に示した手順で供試体寸法の初期値を計測している。

結果より、再構成試料の凍結時の体積ひずみ $\varepsilon_{vol(freeze)}$ は、同じ凍結拘束圧 $\sigma_{c(freeze)}$ であったにもかかわらず、 $\varepsilon_{vol(freeze)} = -0.16 \sim -5.8\%$ の範囲にばらついている。また、融解時の体積ひずみ $\varepsilon_{vol(thaw)}$ に関しても、 $\varepsilon_{vol(thaw)} = 0.3 \sim 5.3\%$ の範囲にばらついており、融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いによる一貫した傾向は得られていない。しかし、高い拘束圧で融解された TxTon-R6 では、他の試料よりも大きな $\varepsilon_{vol(thaw)}$ を示している。全体の供試体数が少ないため一概には言えないが、4.3 にて示した凍結試料の結果と同様、 $\varepsilon_{vol(thaw)}$ は $\sigma_{c(thaw)}$ の影響を受けているといえよう。

また、表 4.7.1 には凍結試料の融解ひずみの計測結果の平均値も記しているが、再構成試料による融解ひずみと比較すると、同じ $\sigma_{c(thaw)}$ であるにもかかわらず、凍結試料の方が約 4~5 倍大きな値を示している。同じ拘束圧で凍結・融解された ($\sigma_{c(freeze)} = \sigma_{c(thaw)}$) 再構成試料の結果では、 $\varepsilon_{vol(freeze)}$ と $\varepsilon_{vol(thaw)}$ の絶対値は概ね同等であった。この傾向は Yoshimi & Goto (1996)によっても確認されている。したがって、凍結試料も原位置凍結時には融解ひずみと同等の凍結ひずみが生じていると考えることができる。しかし、今回の室内試験では、凍結試料の融解が等方応力状態で行われたのに対し、原地盤では K_0 状態であったこと、再構成試料の凍結・融解履歴が等方応力状態で行われたこと、および再構成試料の凍結・融解ひずみが、凍結試料の融解ひずみよりもかなり小さい値であったことを考慮すると、凍結試料の融解ひずみや再構成試料による実験からは、凍結試料の原位置凍結ひずみを推定することは難しいといえる。

再構成試料による凍結・融解ひずみ量が、凍結試料の融解ひずみ量よりもかなり小さくなった原因としては、上記の応力状態の影響のほか、凍結試料では原位置凍結速度が想定よりも早かったことが原因である可能性が考えられる。この場合、間隙水が排水される間もなく凍結するため、凍結膨張量が大きくなり、結果として融解収縮量も大きくなる可能性がある。また、再構成試料では繰返しせん断履歴により土粒子構造の安定性を高めた状態で凍結実験を実施したが、セメンテーションの影響については考慮されていない。沖積層である利根川砂試料については、基本的にセメンテーションの影響は小さいものと考えられるが、再構成試料では表現できない僅かな膠着物質の存在が地盤凍結時の排水作用を阻害した可能性も考えられる。

一般的に、試料が砂であり、間隙水の出入りが自由であれば、凍結履歴が供試体の有する強度に影響を及ぼすことはないといわれている。しかし、原位置では土粒子構造を乱し、かつ大きな凍結膨張が生じる可能性がいくつか存在する。

凍結過程における試料は、土粒子、氷、空気、水の 4 相構造といわれており、それぞれの熱伝導率は非常に異なる (表 4.7.2)。例えば、Arenson & Sego (2006)による砂の一次元的凍結過程

の観察結果によると、土粒子自体（石英）は水の 15 倍の熱伝導率を有することから、マクロ的には一次元の凍結過程で *freeze front* は水平に見えているようでも、ミクロ的には二次元、三次元的な複雑な挙動をすると指摘している。一般的には、凍結過程においては、氷への変化に伴い体積は 9 % 膨張するが、その膨張にあわせて *freeze front* から間隙水は押し出される。しかし、間隙がある程度存在する場合、土粒子の表面から凍結し始めた水はポケット状に閉じ込められると考えられる（図 4.7.4）。このときの土粒子表面付近で凍結した水の体積変化により生じる、閉じ込められた水の水圧上昇は氷点降下を引起し、間隙水の完全な凍結には更に温度を低くする必要がある。このポケット状に閉じ込められた水の氷点降下により、周辺の熱エネルギーが奪われることから周辺土粒子表面付近の水の凍結が一気に進み、ポケットの形成が周辺に広がっていく可能性が考えられる。このようにポケット状に閉じ込められた間隙水の凍結膨張は、土粒子構造にダメージを与える可能性が考えられる。

このような現象を仮定すると、土粒子同士のコンタクトが多いほど、凍結過程において間隙水のポケットが形成され、凍結中の排水が十分でなくなる可能性が高い。土粒子同士のコンタクトが多いほど凍結膨張や土粒子構造のダメージに対する抵抗性も高いため、両者のバランスを考慮する必要があるが、原位置に分布する間隙水は純粋な水とは異なり、不純物を含んでいると考えられ、不純物の存在により間隙水の氷点降下が生じればポケットもできやすくなるといえる。したがって、原地盤で凍結させた場合は、間隙水として蒸留水を用いた室内での凍結試験よりも凍結膨張量は大きくなる可能性は高い。

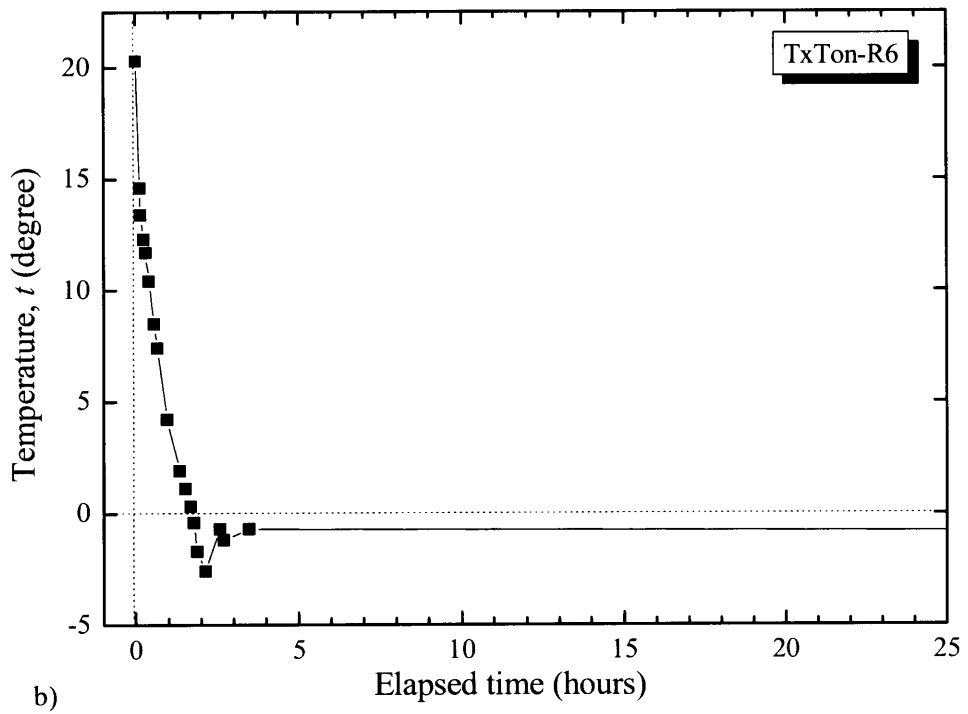
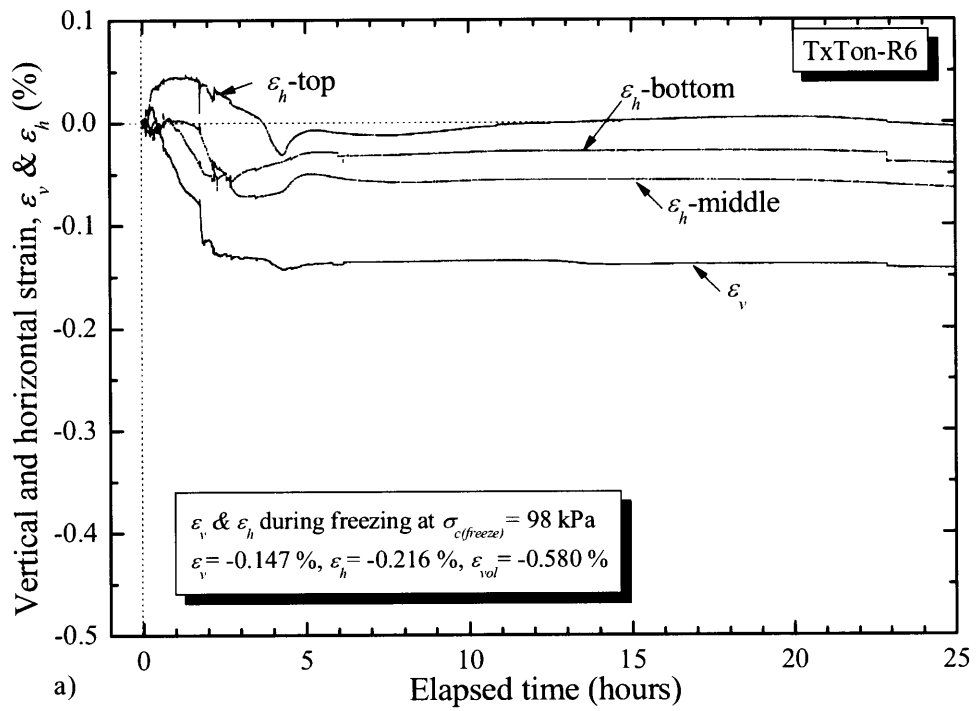


図 4.7.1 繰返しせん断履歴を有する利根川砂再構成試料 (TxTon-R6) の
 a) 凍結時のひずみ, b) 供試体温度変化

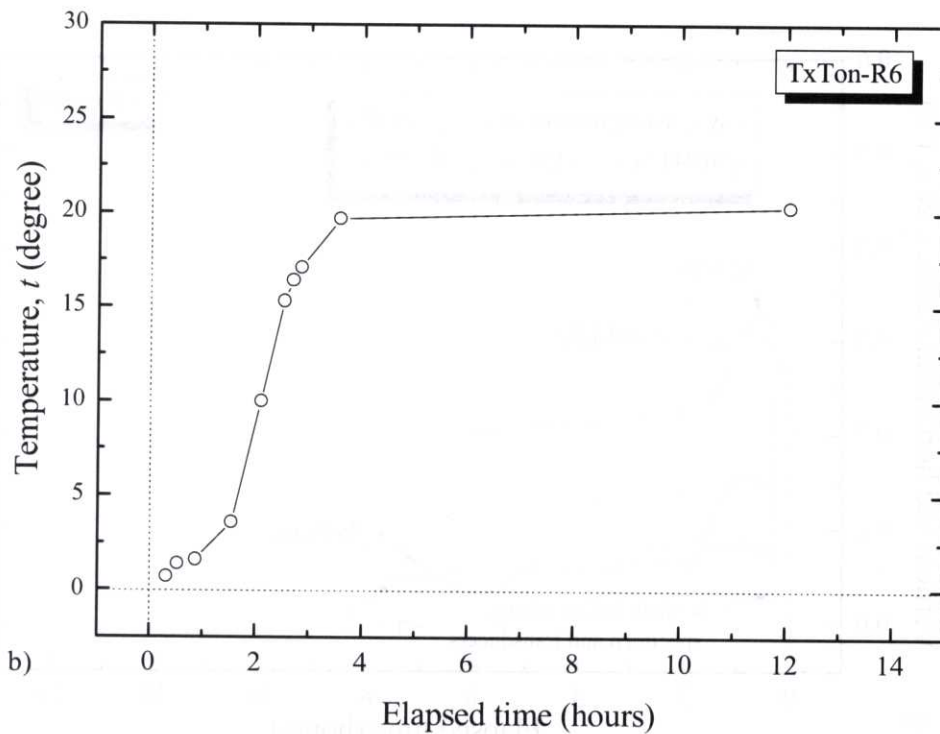
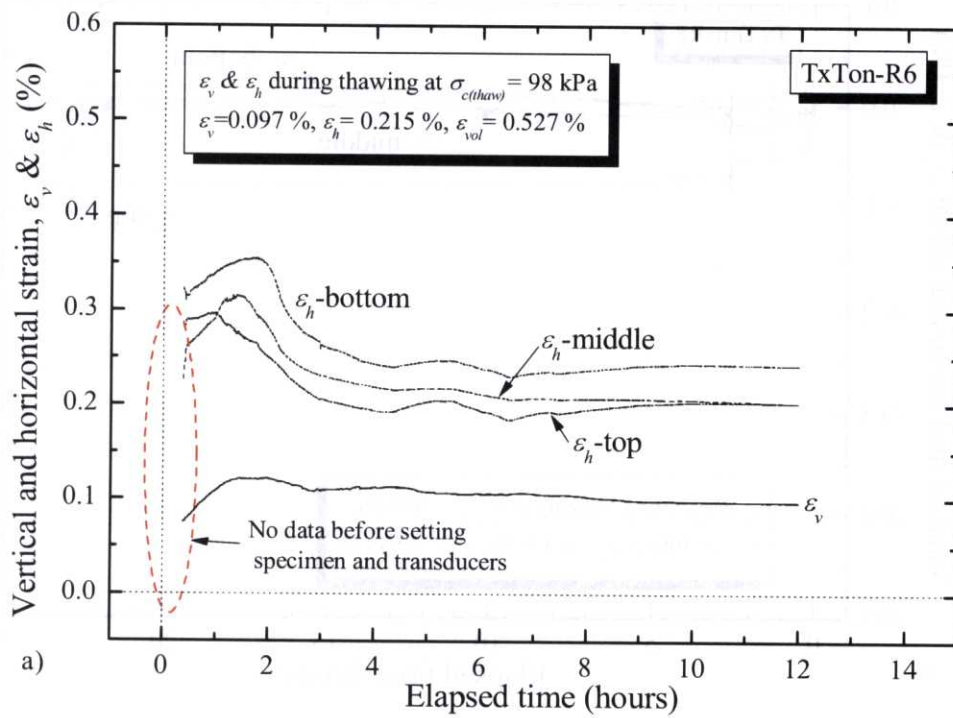


図 4.7.2 繰返しせん断履歴を有する利根川砂再構成試料 (TxTon-R6) の
 a) 融解時のひずみ, b) 供試体温度変化

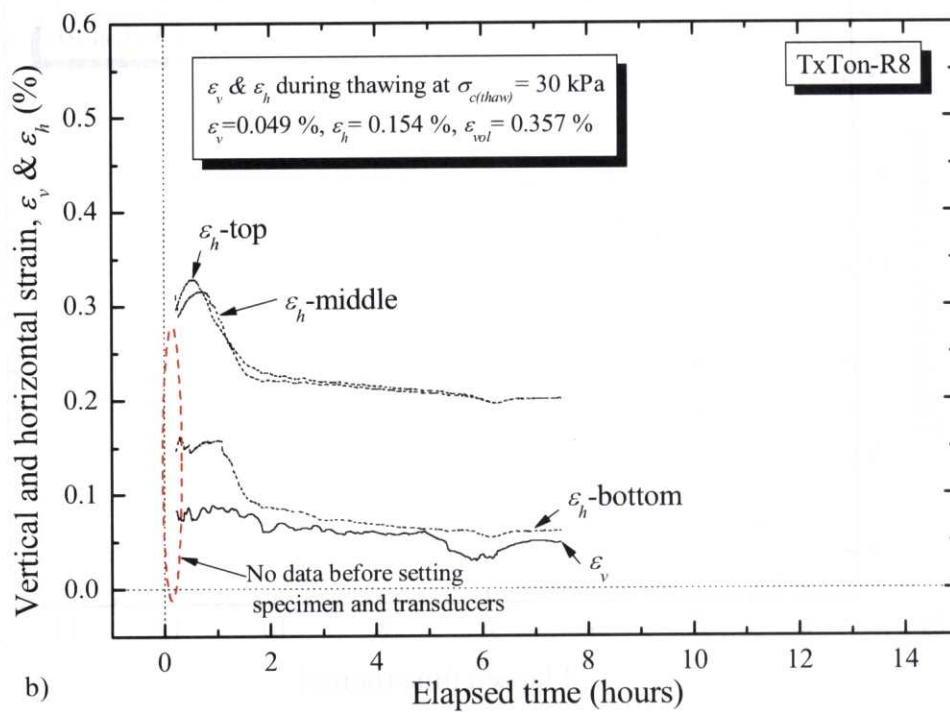
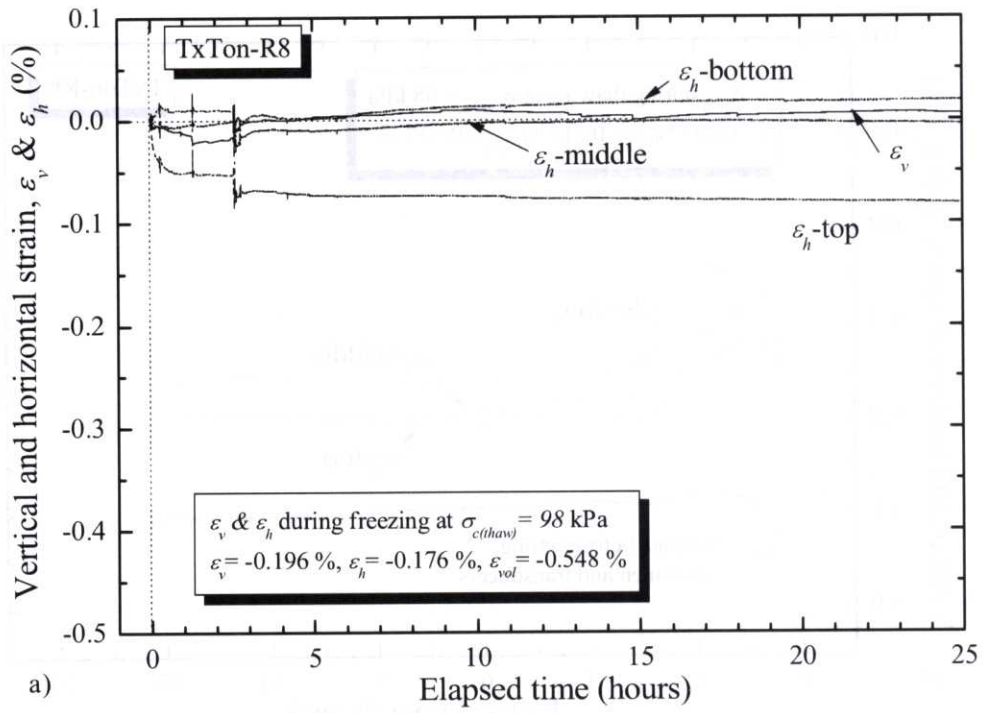


図 4.7.3 繰返しせん断履歴を有する利根川砂再構成試料 (TxTon-R8) の
a) 凍結・b) 融解時のひずみ

表 4.7.1 繰返しせん断履歴を有する利根川砂再構成試料の凍結・融解ひずみ

試料名	試料 No.	拘束圧 凍結時/融解時 (kPa)	軸ひずみ ε_v 凍結時/融解時 (%)	側方ひずみ ε_h 凍結時/融解時 (%)	体積ひずみ ε_{vol} 凍結時/融解時 (%)
再構成 試料	TxTon-R6	98 / 98	-0.147 / 0.097	-0.216 / 0.215	-0.580 / 0.527
	TxTon-R7	98 / 98	-0.099 / 0.148	-0.066 / 0.094	-0.248 / 0.335
	TxTon-R8	98 / 30	-0.196 / 0.049	-0.176 / 0.154	-0.548 / 0.357
	TxTon-R9	98 / 30	-0.094 / 0.047	-0.035 / 0.129	-0.163 / 0.304
凍結 試料	TxTon- F1, 2, 4, 5, 7	- / 98	- / 0.696*	- / 0.734*	- / 2.148*
	TxTon- F3, 6, 8	- / 30	- / 0.487*	- / 0.574*	- / 1.626*

* : 凍結試料の融解ひずみの値は平均値

表 4.7.2 土を構成する物質の熱伝導率（理科年表）

項目	温度 (°C)	熱伝導率 (W/mK)
空気	0	0.0241
水	0	0.561
氷	0	2.2
砂	20	0.3
石英(水晶)	70	9.3
雲母	100~ 600	0.55~ 0.79

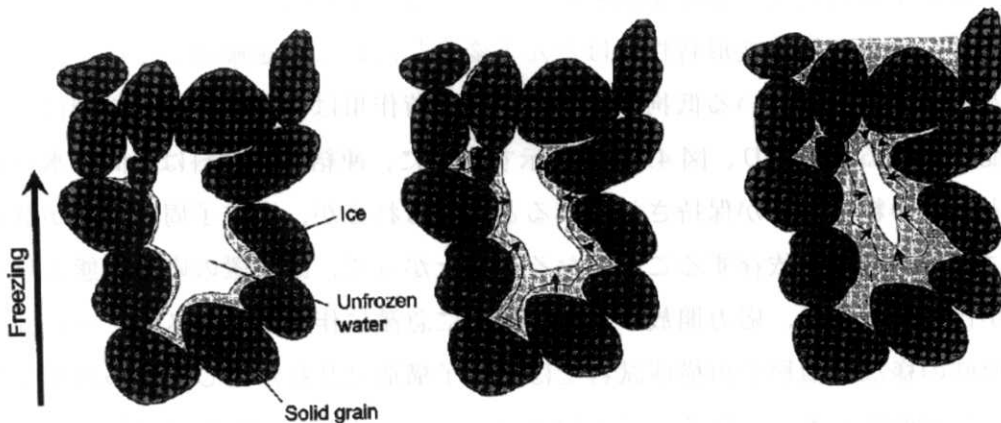


図 4.7.4 土の凍結過程概念図（Arenson & Segoo, 2006）

4.7.2 凍結融解履歴と微小変形特性

拘束圧 98 kPa にて凍結された繰返しせん断履歴を有する利根川砂再構成試料について、その融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ を、98 kPa と 30 kPa の二通りに設定し、最終圧密応力 ($p' = 100$ kPa) における凍結・融解履歴前後の微小変形特性を比較した。

微小変形特性の計測結果を表 4.7.3 に示す。凍結拘束圧 $\sigma_{c(freeze)}$ と融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ が最終圧密拘束圧とほぼ等しい TxTon-R6 については、凍結融解履歴前後で微小変形特性の変化はほとんど認められなかった。また、同様の凍結融解履歴を有する TxTon-R7 についても、凍結融解前後で静的ヤング率 E_s の値が若干低下しているが、動的ヤング率 E_d および動的せん断剛性率 G_d にほとんど変化は認められない。一方、低い拘束圧で融解され、再度最終圧密応力まで圧密された TxTon-R8, R9 については、凍結融解履歴により微小変形特性は 10 %程度 低下する傾向が認められる。これらの傾向は、全体的に動的剛性の結果において一貫性が認められる。また、加速度計取付け方法の改良前後のデータが混在しているため、試料によっては動的ヤング率 E_d の計測値にばらつきが認められるが、凍結融解履歴前後の E_d の比で整理すると概ね整合した結果が得られている。

また、表 4.7.4 には凍結試料による高融解拘束圧試料と低融解拘束圧試料の微小変形特性の結果の平均値を示しているが、この両者の比が、表 4.7.3 に示した低い拘束圧で融解された再構成試料 (TxTon-R8, R9) の微小変形特性 (特に静的ヤング率 E_s と動的せん断剛性率 G_d) の凍結融解履歴前後の比とほぼ同じ値を示していることが興味深い。

このような融解拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ の違いによる微小変形特性の低下は、試料の乱れの程度を表している可能性が考えられる。原位置凍結時の拘束圧より低い拘束圧で融解させることは、巨視的には除荷を行っていることと同義である。しかし、一般的に均質な砂試料であれば再圧密による力学的挙動の変化は小さい。例えば Koseki & Ohta (2001) は、長期間のクリープによりセメンテーションの効果を持たせた過圧密試料について、等方除荷時と再載荷時の微小変形特性を計測しているが、両者の微小変形特性はほとんど変化しないことを確認している。

しかし、本研究で検討している低拘束圧融解時の除荷作用は、通常の応力制御によるものとは異なる可能性がある。つまり、図 4.7.5 a) に示すように、凍結採取試料は、間隙水の凍結により、原位置と同等の粒子間力が保持されていると考えられるが、土粒子周りの氷が解けた瞬間に粒子間力は融解拘束圧に依存することになる。したがって、原位置の応力状態よりも低い拘束圧で融解が行われた場合、応力開放が土粒子構造に急激に作用し、セメンテーション効果が小さい利根川砂の様な沖積層や再構成試料では土粒子構造に乱れが生じ、その影響で微小変形特性が低下した可能性が考えられる (図 4.7.5 b))。しかし、江戸川砂 B, C 試料のような洪積層では、利根川砂試料と比較して、融解時拘束圧の低下の伴う微小変形特性の低減率は小さかった。これは、セメンテーションの効果が低融解拘束圧による急激な除荷作用に抵抗したことによると推定される (図 4.7.5 c))。

表 4.7.3 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料の凍結・融解履歴による微小変形特性の変化

試料名	試料 No.	凍結/融解時 拘束圧 (kPa) $\sigma_{c(freeze)} / \sigma_{c(thaw)}$	凍結前-融解後 E_s (MPa) (凍結前/融解後)	凍結前-融解後 E_d (MPa) (凍結前/融解後)	凍結前-融解後 G_d (MPa) (凍結前/融解後)
利根川砂 再構成試料 (CL: 10,000)	TxTon-R6+	98 / 98	202.7- 202.2 (1.00)	-	113.2- 116.4 (1.03)
	TxTon-R7+	98 / 98	179.9- 169.1 (0.94)	328.2- 329.9 (1.01)	114.0- 114.8 (1.01)
	TxTon-R8	98 / 30	217.6- 204.9 (0.94)	860.7- 702.9 (0.82)	112.4- 99.5 (0.89)
	TxTon-R9	98 / 30	189.6- 186.0 (0.98)	1016.8- 909.3 (0.89)	105.6- 95.3 (0.90)

+ : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

表 4.7.4 利根川砂凍結試料の融解時拘束圧の違いと微小変形特性の平均値

試料名	試料 No.	融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	E_s	E_d+	G_d
利根川砂 凍結試料	TxTon-F1, 2, 4, 5, 7	98	177.0	357.7	109.6
	TxTon-F3, 6, 8	30	171.4(0.97)*	320.7(0.90)*	98.7(0.90)*

+ : E_d は加速度計取付け方法改良前の実験結果

* : 下段 () は融解時拘束圧 98 kPa の結果との比

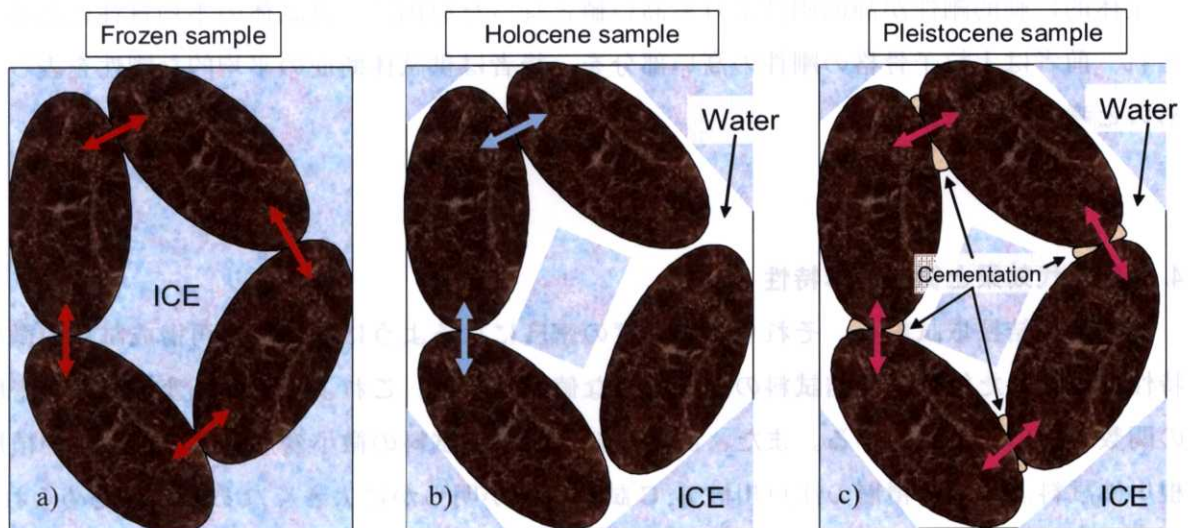


図 4.7.5 凍結採取試料の融解過程概念図 a) 凍結時, b) 融解時 (沖積層), c) 融解時 (洪積層)

4.8 まとめ

本章では、堆積年代の異なる地層から採取した凍結試料と、その再構成試料を用い、応力履歴や凍結融解履歴の影響と微小変形特性との関係について実験的に検討してきた。これらの結果は、原位置の地盤状態と供試体の乱れの把握する資料であると共に、次章に続く液状化強度特性との関連性においても重要な役割を果たす。

ここでは、本章の実験結果を基に、主な留意事項を記す。また、表 4.8.1~4.8.3 に、各試料の等方圧密・応力履歴後（液状化試験直前）の微小変形特性をまとめた。

4.8.1 静的剛性と動的剛性

微小変形特性について、動的計測結果と、静的計測結果とでは異なる値を示すかどうかについては、研究者によりその見解は異なる。本研究では明らかに動的微小変形特性の方が静的の値よりも大きくなる傾向が認められた。

静的剛性と動的剛性の比は、ヤング率では $E_s/E_d = 0.2 \sim 0.3$ 程度（加速度計取付け方法改良前では $E_s/E_d = 0.5$ 程度）、動的計測時の供試体の非排水条件を考慮したヤング率では $E_s/E_d^* = 0.25 \sim 0.4$ 程度（加速度計取付け方法改良前では $E_s/E_d^* = 0.6$ 程度）の値となった。ヤング率において、このように動的剛性が非常に大きくなった原因の一つとしては、間隙水を伝播する P 波の影響が支配的であると考えられる。

また、せん断剛性率では $G_s^*/G_d = 0.5 \sim 1.0$ の範囲にばらついているが、江戸川砂 C 試料以外では概ね 0.75 以上の値となっている。せん断剛性率については間隙水の影響や加速度計取付け方法の違いによる影響は少ないものと考えられる。

全体的に動的剛性が静的剛性よりも高い値となった原因は、供試体の不均質性にあると考えられ、前者は土粒子骨格の剛性の高い部分を、後者は供試体断面の平均的な剛性を表しているものと考えられる。

4.8.2 年代効果と微小変形特性

原位置凍結採取試料と、それらと同程度の密度になるように調節した再構成試料の微小変形特性を比較した結果、凍結試料の方が大きな値を示した。これより、微小変形特性は密度のみ関数でないことがわかる。また、凍結試料と再構成試料の微小変形特性の差は、沖積層の利根川砂試料よりも洪積層の江戸川砂 B, C 試料の方が明らかに大きくなる傾向が認められた。この原因としては、凍結試料には年代効果の影響が現れていると考えられ、特に洪積層より採取した試料ではその影響が顕著であったものと考えられる。また、凍結試料による一軸圧縮試験

より、江戸川砂 C 試料の方が B 試料よりも高い一軸圧縮強度を示した。この結果は凍結試料と再構成試料の微小変形特性の差にも表れており、江戸川砂 C 試料の方が B 試料よりも差は大きくなっている。

また、年代効果を有する土の特徴として、圧密応力増加に伴う微小変形特性増加の割合が、年代効果を持たない試料より小さくなる傾向が考えられる。この傾向は、今回の実験では特に動的せん断剛性率において明確に現れた。

4.8.3 応力履歴による年代効果

自然地盤の年代効果の発達過程について、砂地盤を対象に順序立てると、①自然堆積、②応力履歴（地下水位変動、地震外力、地形改変等）による土粒子構造の安定化、③続成作用に伴う膠着物質の発達（セメンテーション）のようになるものと考えられる。

本研究では、利根川砂試料（沖積層）と江戸川砂 B, C 試料（洪積層）の再構成試料に繰返しせん断履歴を与えることで、微小変形特性が増加することを確認した。繰返しせん断履歴による供試体の体積変化は小さなものであり、微小変形特性増加の原因は、上記②の土粒子構造の安定化と考えることができる。

結果として、利根川砂試料については、10,000 回の繰返しせん断履歴を与えることで凍結試料と同等の微小変形特性（特に動的せん断剛性率）を得ることができたが、江戸川砂 B, C 試料では 20,000 回の履歴を与えても凍結試料より低い微小変形特性を示した。凍結試料と同程度の微小変形特性を得ることが、再構成試料において年代効果を考慮することと同義であるならば、利根川砂試料では 10,000 回の繰返しせん断履歴を与えることで凍結試料に準ずる再構成供試体を作成できることになる。この考え方については更なる検討が必要ではあるが、利根川砂試料は 8,500~ 70,00 年前に、比較的地震の多い関東地区に堆積した地盤であり、地下水位変動も考慮すると、室内試験における繰返し回数 10,000 回に相当する程度の応力履歴は受けている可能性は高い。

なお、江戸川砂 B, C 試料は洪積層であるため、上記③のセメンテーションの影響を考慮する必要があり、繰返しせん断履歴だけでは凍結試料と同等の微小変形特性が得られなかった可能性がある。しかし、応力履歴を与える前と比較すると、応力履歴後の微小変形特性は凍結試料の値にかなり近い値となっている。

4.8.4 凍結採取試料の乱れ

本研究では異なる拘束圧において凍結試料を融解させ、微小変形特性を比較した。その結果、原位置有効上載圧相当の高い拘束圧で融解させた方が、低い拘束圧の場合よりも大きな微小変

形特性の値を示した。この傾向は、沖積層である利根川砂試料、および江戸川砂 A 試料において顕著であり、洪積層である江戸川砂 B, C 試料では融解拘束圧の違いによる微小変形特性の変化は小さかった。また、再構成試料による凍結・融解試験においても同様の傾向が認められた。低い融解拘束圧では、微視的には応力開放が土粒子の構造に急激に作用するため、セメンテーション効果を持たない沖積層や再構成試料では、土粒子構造に乱れが生じ、微小変形特性が低下した可能性が考えられる。なお、高い拘束圧で融解させた凍結試料の動的せん断剛性率 G_d は、原位置 PS 検層による値と概ね一致した。

供試体の融解時体積ひずみについては、融解開始直後から僅かな時間で、融解ひずみのほとんどが生じ、また融解過程において供試体表面温度が 4℃程度になる時に、供試体の収縮ひずみにピークが生じている。これは間隙水の密度の最大値を示す温度が約 4℃であることから説明が可能である。また、凍結時と融解時の拘束圧が同じであれば、凍結ひずみと融解ひずみの値は同程度の値になると考えられるが、再構成試料による凍結ひずみと、凍結試料の融解ひずみは、後者の方がかなり大きくなる傾向が認められた。

再構成試料の凍結時においても、供試体温度が 4℃の時に体積収縮ひずみのピーク（最大値）が認められた。この傾向を考慮すると、原位置凍結時においても地盤の体積は常温から 4℃では収縮し、4℃から 0℃にかけては膨張していることが考えられる。即ち、原位置地盤は、凍結試料による最終的に計測された融解体積ひずみより大きな体積ひずみの変化が凍結過程において生じているといえる。

これらのような実験結果を基に、凍結試料採取時、および凍結供試体の整形・実験準備段階における留意点としては、以下が考えられる。

- ・ 凍結試料採取に伴う地盤凍結時には、間隙水膨張に伴う地盤の乱れを防ぐためにゆっくりと凍結させる配慮が一般的になされているが、地盤内温度が 4℃以下の地盤膨張領域となる間では、特に慎重に凍結速度を制御する必要がある。
- ・ 凍結試料（特に沖積層）の乱れは融解拘束圧の低下によって生じ、かつ融解に伴う体積変化は常温では非常に早く生じる。したがって、試料採取時から室内試験において所定の拘束圧をかけるまでの間、供試体周辺温度には常に配慮すべきであり、数分でも常温下に曝すことは避けるべきである。
- ・ 上記と同様の理由により、凍結試料（特に沖積層）の融解時の拘束圧は、原位置凍結時の応力状態と同じ拘束圧で行われるべきである。しかし、融解速度の影響および融解後の飽和時の拘束圧の影響については、今後更なる検討が必要である。

表 4.8.1 凍結試料の圧密終了後（液状化試験直前）の微小変形特性

試料名 (採取深度 m)	試料 No.	融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	Void ratio at σ'_{cl}	D_r (%)	E_s (MPa)	E_d (MPa)	G_d (MPa)
利根川砂 (GL-11.8~12.1)	TxTon-F1*	98	0.720	88.5	186.7	380.6	108.8
	TxTon-F2*	98	0.750	80.8	-	377.4	113.6
	TxTon-F3*	30	0.715	89.8	165.0	337.4	98.9
	TxTon-F4*	98	0.734	84.9	176.5	325.0	112.7
	TxTon-F5*	98	0.764	77.2	176.9	359.5	111.5
	TxTon-F6*	30	0.708	91.6	184.3	309.4	101.5
	TxTon-F7*	98	0.725	87.2	167.7	346.0	101.3
	TxTon-F8*	30	0.729	86.2	165.0	315.4	95.8
江戸川砂 A (GL-5.3~5.5)	TxEdo-A-F2	60	1.167	-	47.2	253.0	29.5
	TxEdo-A-F3	60	1.157	-	51.6	270.4	29.7
	TxEdo-A-F4	60	1.184	-	55.2	244.6	28.6
	TxEdo-A-F5	10	1.189	-	43.1	194.5	23.9
江戸川砂 B (GL-10.3~11.0)	TxEdo-B-F1	98	0.838	61.5	281.2	-	128.0
	TxEdo-B-F3	30	0.811	69.6	255.1	1128.7	123.7
	TxEdo-B-F4	30	0.835	62.4	-	1028.8	112.8
	TxEdo-B-F5	98	0.815	68.4	244.3	1166.0	127.1
江戸川砂 C (GL-16.0~17.6)	TxEdo-C-F2*	30	0.710	100.1	415.6	756.2	305.0
	TxEdo-C-F3*	98	0.696	104.3	427.3	1040.9	330.1
	TxEdo-C-F4	98	0.818	75.1	333.1	1049.8	311.7
	TxEdo-C-F5	30	0.834	71.3	377.9	1247.1	287.3
	TxEdo-C-F6	98	0.773	85.9	364.6	-	-

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

表 4.8.2 再構成試料の圧密・応力履歴後（液状化試験直前）の微小変形特性

試料名	試料 No.	応力履歴	Void ratio at σ'_{cl}	Dr (%)	E_s (MPa)	E_d (MPa)	G_d (MPa)
利根川砂 再構成試料	TxTon-R1*	Without stress history	0.720	88.5	160.9	309.8	84.4
	TxTon-R2*	CL20,000	0.763	77.5	-	352.0	134.8
	TxTon-R3*	CL10,000	0.732	85.4	178.8	329.8	112.3
	TxTon-R5*	Without stress history	0.709	91.3	144.0	292.8	87.2
	TxTon-R6*	CL10,000, F&T (98 kPa)	0.692	95.7	202.2	-	116.4
	TxTon-R7*	CL10,000, F&T (98 kPa)	0.710	91.0	169.1	329.9	114.8
	TxTon-R8	CL10,000, F&T (30 kPa)	0.730	85.9	204.9	702.9	99.5
	TxTon-R9	CL10,000, F&T (30 kPa)	0.764	77.2	186.0	909.3	95.3
	TxTon-R10	CL10,000	0.771	75.4	197.8	1166.5	107.5
	TxTon-R11	Without stress history	0.764	77.2	165.6	-	84.4
	TxTon-R12	Creep (110 hours)	0.748	81.3	169.0	671.1	73.8
	TxTon-R13	CL10,000	0.694	95.1	-	-	-
	江戸川砂 B 再構成試料	TxEdo-B-R1	Without stress history	0.740	91.0	192.9	581.5
TxEdo-B-R2		Without stress history	0.830	63.9	160.5	579.3	93.1
TxEdo-B-R3		Without stress history	0.805	71.4	165.6	569.8	88.6
TxEdo-B-R6		Without stress history	0.828	64.5	166.8	542.7	90.6
TxEdo-B-R7		CL10,000	0.807	66.2	182.2	687.3	109.5
TxEdo-B-R8		CL20,000	0.818	63.4	214.4	499.3	117.7
TxEdo-B-R9		Without stress history	0.859	52.9	-	639.6	98.8
TxEdo-B-R10		CL20,000	0.807	66.2	-	729.1	116.5
江戸川砂 C 再構成試料	TxEdo-C-R1	Without stress history	0.755	90.2	228.1	933.6	163.2
	TxEdo-C-R2	CL10,000	0.746	92.3	360.5	1277.8	218.0
	TxEdo-C-R3	CL20,000	0.764	88.0	293.7	1162.8	223.0
	TxEdo-C-R4	Creep (210 hours)	0.780	84.2	262.6	960.0	171.4
	TxEdo-C-R5	CL20,000 at 60 kPa	0.736	84.7	218.2	915.4	181.3
	TxEdo-C-R6	Without stress history	0.696	104.3	268.0	901.5	180.6
	TxEdo-C-R7	Without stress history	0.715	99.8	254.3	1132.2	132.2
	TxEdo-C-R8	CL20,000	0.773	85.9	314.0	1160.9	220.8
	TxEdo-C-R10	CL20,000	0.683	107.4	396.1	-	244.9
	TxEdo-C-R11	Without stress history	0.727	96.9	216.4	1006.9	158.4

*： 加速度計取り付け方法改良前の実験結果

表 4.8.3 各試料の微小変形特性の平均値

試料名		応力履歴等	E_s (MPa)	E_d (MPa)	G_d (MPa)
利根川砂	凍結 試料	$\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa	177.0	357.7*	109.6
		$\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa	171.4	320.7*	98.7
	再構成 試料	Without stress history	156.8	301.3*	85.3
		CL10,000	188.3	329.8* 1166.5	109.9
		CL20,000	-	352*	134.8
		CL10,000, F&T (98 kPa)	185.65	329.9	115.6
		CL10,000, F&T (30 kPa)	195.45	806.1	97.4
		Creep (110 hours)	169	671.1	73.8
江戸川砂 A	凍結 試料	$\sigma_{c(thaw)} = 60$ kPa	51.3	256.2	29.3
		$\sigma_{c(thaw)} = 10$ kPa	43.1	194.5	23.9
江戸川砂 B	凍結 試料	$\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa	262.8	1166.0	127.6
		$\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa	255.1	1078.8	118.3
	再構成 試料	Without stress history	171.5	582.6	91.2
		CL10,000	182.2	687.3	109.5
		CL20,000	214.4	614.2	117.1
江戸川砂 C	凍結 試料	$\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa	375.0	1040.9* 1049.8	320.9
		$\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa	396.8	756.2* 1247.1	296.2
	再構成 試料	Without stress history	241.7	993.6	158.6
		CL10,000	360.5	1277.8	218
		CL20,000	334.6	1161.9	229.6
		CL20,000 at 60 kPa	218.2	915.4	181.3
		Creep (210 hours)	228.1	960.0	171.4

* : 加速度計取り付け方法改良前の実験結果

《参考文献》

- 1) AnhDan, L., Koseki, J. and Sato, T. (2002): Comparison of young's moduli of dense sand and gravel measured by dynamic and static methods, *Geotechnical Testing Journal*, **25** (4), 349-368.
- 2) AnhDan, L. and Koseki, J. (2003): Anisotropic deformation properties of dense granular soils by large-scale true triaxial tests, *Deformation Characteristics of Geomaterials*, Swets & Zeitlinger, Lisse, 305-312.
- 3) Arenson, L.U. and Segoo, D.C. (2006): The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands, *Canadian Geotechnical Journal*, **43**, 325-337.
- 4) Bellotti, R., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D.C.F. and O'neill, D.A. (1996): Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand, *Geotechnique*, **46** (1), 115-131.
- 5) Goto, S. (1986): Strength and characteristics of granular materials in triaxial tests, Dr. Eng. Thesis, University of Tokyo.
- 6) Goto, S. (1993): Influence of freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils, *Soils and Foundations*, **33**(4), 148-158.
- 7) Goto, S., Matsueda, S., Morii, Y. And Sueoka, T. (1999): Small strain stiffness of sands in isotropic compression and liquefaction tests, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Rotterdam, 275-281.
- 8) Hardin, B. O. and Richart, F.E. (1963): Elastic wave velocities granular soils, *Journal of ASCE*, **89** (1), 33-65.
- 9) Hoque, E. (1996): Elastic deformation of sands in triaxial tests, Dr.Eng. Thesis, Univ. of Tokyo.
- 10) Hoque, E., Tatsuoka, F. and Sato, T. (1996): Measuring anisotropic elastic properties of sand using a large triaxial specimen, *Geotech. Testing J.*, ASTM, **19** (4), 411-420.
- 11) Hoque, E. and tatsuoka, F. (1998): Anisotropy in elastic deformation of granular materials, *Soils and Foundations*, **38**(1), 163-179.
- 12) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G.L., Hoque, E. and Kodaka, T. (1997): Modelling of non-linear deformation properties of stiff geomaterials, *Geotechnique*, **47** (3), 563-580.
- 13) Koseki, J. and Ohta A. (2001): Effects of different consolidation conditions on liquefaction resistance and small strain quasi-elastic deformation properties of sands containing fines, *Soils and Foundations*, **41** (6), 53-62.
- 14) Maqbool, S. (2005): Effects of compaction on strength and deformation properties of gravel in triaxial and plane strain compression tests, Dr. thesis, Univ. of Tokyo.
- 15) Santamarina, J.C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001): *Soils and waves*, John Wiley & Sons, LTD.

- 16) Seed, H.B. (1979): Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. GT2, 201-255.
- 17) Tanizawa, S., Teachavorasinskun, S., Yamaguchi, J., Sueoka, T. and Goto, S. (1994): Measurement of shear wave velocity of sand before liquefaction and during cyclic mobility, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Rotterdam, 63-68.
- 18) Tatsuoka, F., Jardine, R.J., Lo Presti, D., Di Benedetto, H. and Kodaka, T. (1997): Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials, *Proc. of 14th ICSMFE*, 4, 2129-2164.
- 19) Teachavorasinskun, S., Tatsuoka, F. and Lo Presti, D.C.F. (1994): Effects of the cyclic prestraining on dilatancy characteristics and liquefaction strength of sand, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Rotterdam, 75-80.
- 20) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y. (1986): Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli, *Soils and Foundations*, 26 (1), 25-35.
- 21) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. (1986): Effects of sample disturbance on dynamic properties of sand, *Soils and Foundations*, 26 (1), 53-64.
- 22) Wicaksono, R. I. (2007): Small strain stiffness of sand and gravel based on dynamic and static measurements, Master. of Eng. Thesis, Univ. of Tokyo.
- 23) Yamashita, S., Hori, T. and Suzuki, T. (2003): Effects of fabric anisotropy and stress condition on small strain stiffness of sands, *Proc. of International Workshop on the Deformation Characteristics of Geomaterials*, 187-194.
- 24) Yoshimi, Y., Hatanaka, M. and Ohoka, H. (1978): Undisturbed sampling of saturated sands by freezing, *Soils and Foundations*, 18 (3), 59-73.
- 25) Yoshimi, Y. and Goto, S. (1996): Liquefaction resistance of silty sand based on in situ frozen samples, *Geotechnique*, 46 (1), 153-156.
- 26) 飯島正敏 (2000): 凍結サンプリングされた砂質試料の液状化特性に関する非排水繰返し三軸試験, 卒業論文, 日本大学生産工学部.
- 27) 飯島正敏 (2002): 原位置採取凍結試料と再構成試料の液状化特性に関する研究, 修士論文, 日本大学大学院.
- 28) 内田明彦, 畑中宗憲, 竹原直人 (2006): 洪積砂地盤における構造異方性に関する一考察, 第41回地盤工学研究発表会論文集, 397-398.
- 29) 古関潤一, 小野達也, 佐藤剛司 (2001): 豊浦砂の微小ひずみレベルにおけるヤング率とせん断剛性率の応力状態依存性, 第36回地盤工学研究発表会, 231-232.
- 30) 後藤茂, 田地陽一 (1999): 細粒分を含む砂地盤に対する原位置凍結サンプリングの信頼性の評価, 土木学会論文集, 631, III-48, 449-458.

- 31) 佐藤剛司, 永山浩, 河上定弘, 古関潤一 (1999): 豊浦砂の排水繰返し三軸試験中のせん断剛性率と応力状態の関係, *土木学会第54回年次学術講演回講演概要集*, 3(A), 136-137.
- 32) 新宿氷業株式会社: 氷の基礎知識, <http://www.shinpyo-ice.net/ice.html>
- 33) 陶野郁雄 (1975): 堆積物の続成作用と力学性状－南関東における第四紀砂層の粒子構造と一軸圧縮特性－, *地質学雑誌*, 第81巻, 第9号, 547-558.
- 34) 濱谷正司, 古関潤一, 龍岡文夫, 真栄城徳泰 (1997): 豊浦砂の排水繰返し三軸試験における弾性的変形特性, *第32回地盤工学会講演論文集*, 681-682.
- 35) 平山知暁, 堀智仁, 山下聡, 鈴木輝之 (2006): ベンダーエレメント試験による3方向のS波速度およびP波速度の測定, *第41回地盤工学研究発表会論文集*, 375-376.
- 36) 望月竜太 (2001): 砂質土の凍結・融解特性と液状化特性に関する研究, 卒業論文, 日本大学生産工学部.