

第6章

大ひずみ液状化試験

6.1 概説

液状化に伴って地盤に大きな永久変位（側方流動）が生じ、既設構造物が被災した事例は数多く確認されている。1995年兵庫県南部沖地震では、神戸市や芦屋市などで多くの岸壁や護岸が流動した。液状化による側方流動は、古くは1964年新潟地震などでも確認されており、そのメカニズムを明らかにするため、またその変位量を定量的に予測するため、多くの研究が行われてきた。しかし、従来の室内要素試験としての液状化試験（非排水繰返し載荷試験）では、対象とされる変形量（ひずみレベル）は数%～10%程度である。したがって、大変形を伴う液状化流動量の予測についてはケーススタディや模型実験に依存しており、要素レベルで検証した例は少ない。

室内液状化試験については、繰返し三軸試験と中空ねじり試験があるが、応力経路を考慮すると中空ねじり試験の方が地震時の応力状態に近いといえる。また、側方流動を対象とした大ひずみレベルの液状化試験を三軸試験で実施することは非常に困難である。そこで本研究では、せん断ひずみ両振幅を100%程度まで計測できるよう改良された中型中空ねじり試験機（佐藤ら、2007）を用いて、非排水繰返し載荷試験を実施した。使用した中空ねじり試験機の詳細は第2章に詳しく述べている。

本章では、先ず、密度調整された豊浦砂による一連の液状化試験を実施し、砂の大ひずみ液状化挙動に関する基礎的資料を得た。また、大ひずみ液状化試験により、供試体が一樣に変形する液状化限界ひずみを定義した。第5章では、微小変形特性（特に動的せん断剛性率）により、試料の乱れや年代効果、および応力履歴の影響と液状化特性との関係を検討したが、ここでは、第5章と同じ凍結試料と再構成試料を用い、動的せん断剛性率の計測と供に、年代効果や応力履歴が液状化時の大変形挙動および液状化限界ひずみに及ぼす影響を検討した。

6.2 既往の研究

6.2.1 液状化残留変形のメカニズムに関する研究

不整形地盤において残留変形の生ずるメカニズムについて、吉見&福武(2005)は、図6.2.1に示すように、残留ひずみ γ_r はa) 動的影響とb) 軟化の影響に分けられると示している。ここで、 γ_{rd} は初期応力と繰返し応力により残留してゆくひずみであり、 γ_{rs} は過剰間隙水圧の蓄積などによる地盤軟化と重力の作用によって発生する残留ひずみである。また、液状化した砂要素の変形形態としては、図6.2.2に示すような三つの状態が存在し、側方流動のような大変形が生じる場合には、有効応力がゼロの液体状態と一部の粒子間力が回復した状態とを繰り返しながら大きなせん断変形が生じると述べている。

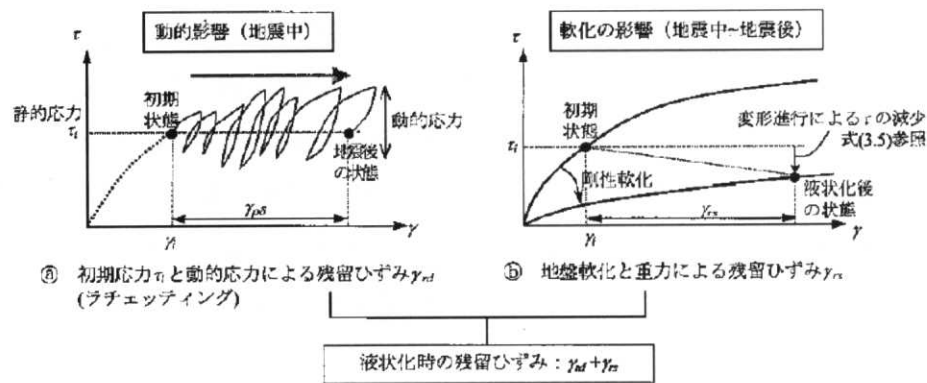


図6.2.1 残留変形発生メカニズム (吉見&福武, 2005 (地盤工学会, 2004を修正))

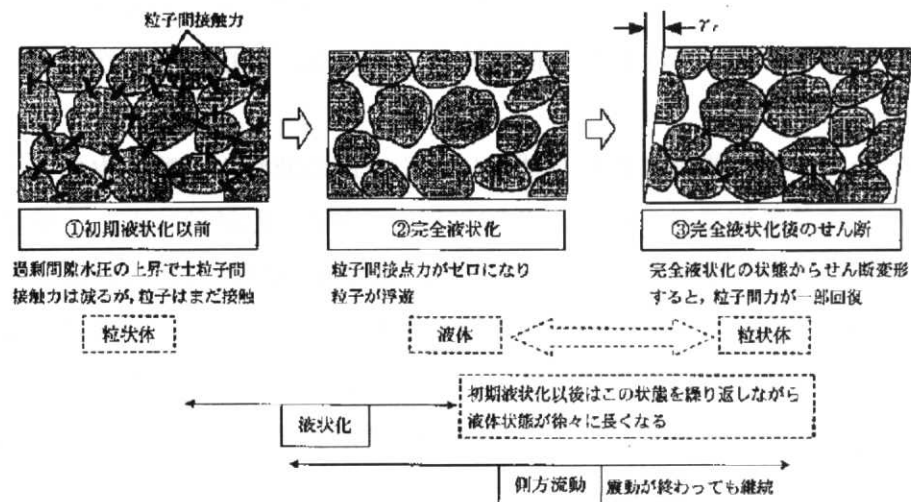


図6.2.2 液状化・側方流動時の地盤の状態 (吉見&福武, 2005 (Shamoto, et al., 1998を修正))

6.2.2 完全液状化時のせん断ひずみのメカニズムに関する研究

非排水状態で供試体に繰返し荷重を与えると、間隙水圧が蓄積して有効応力がゼロになり、完全液状化状態になる。完全液状化状態では変形に対する抵抗がゼロになるため、非常に大きなひずみが生じる。Shamoto, et al. (1997) は、中空ねじり試験により、このような完全液状化後の供試体の挙動を観察している。図6.2.3に相対密度75%の砂試料において実施した一定応力振幅における54回目から59回目までのa) せん断応力とせん断ひずみの関係と、b) 有効応力経路を示す。これによると、繰返し荷重によりせん断応力が回復したときの各繰返し回数における応力ひずみ関係の形状は比較的似ているが、せん断応力が小さく有効応力がゼロになったときには大きなせん断ひずみが生じている。また、有効応力がほぼゼロのときのせん断ひずみは、過去に経験した最大せん断ひずみ振幅が大きいほど大きくなり、その増加率は相対密度が小さいほど大きくなる。

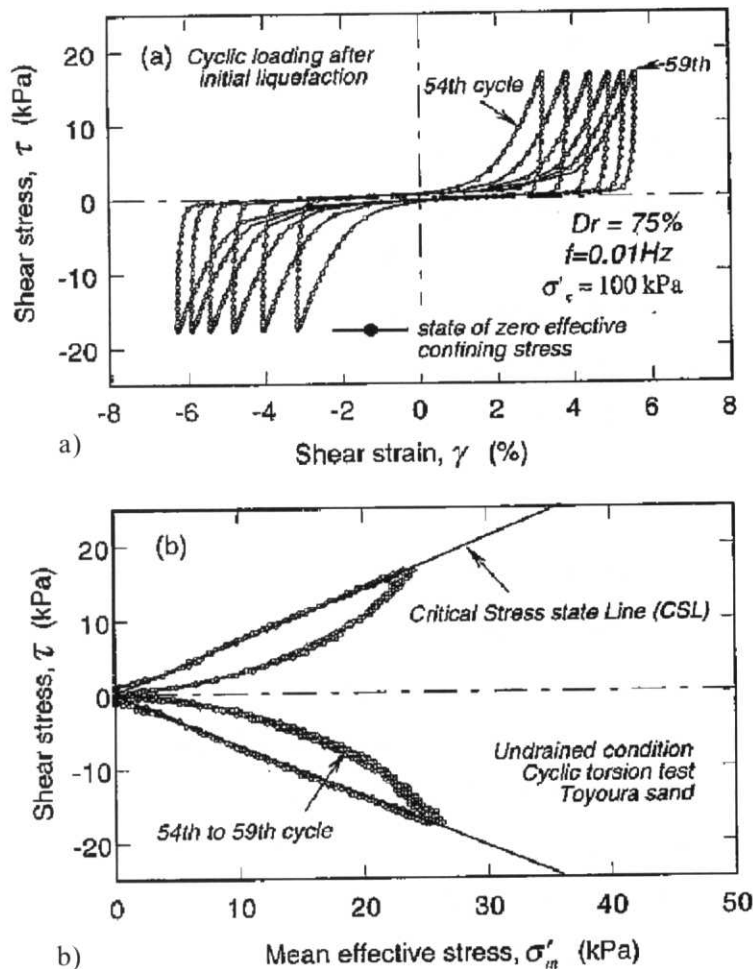


図6.2.3 過剰間隙水圧比が100%に達した後の a) 応力-ひずみ関係と b) 有効応力経路 (Shamoto et al., 1997)

6.2.3 液状化後の単調載荷特性に関する研究

液状化による側方流動現象を、室内試験では非排水繰返しせん断後に単調載荷を行うことで模擬する試みがいくつか報告されている (e.g., 後藤ら(1992, 1993), Vaid (1995), 吉田ら(1994), Shamoto (1997))。これらの既往の研究結果について、吉見&福武(2005) は以下のように整理している。

- ・ 豊浦砂では繰返し載荷により過剰間隙水圧比が90%を超えると、有効応力状態が同程度の繰返し載荷を受けていない試料に比べて著しく剛性が低下する。
- ・ 細粒分を含む試料や、液状化試験前に繰返し応力履歴を与えられた試料では、過剰間隙水圧比が90%を越えても、有効応力状態が同程度であれば、応力履歴のない試料と比較して剛性はあまり変わらない。
- ・ 液状化後の単調載荷を始めた初期段階において、非常に剛性の小さい領域が現れる。その後、有効応力の回復に伴って剛性が回復する。
- ・ 剛性が回復する時点のせん断ひずみは、初期液状化した後に続く繰返しせん断（すなわち液状化継続時間の長さや液状化の激しさ）に依存している。あるいは、 γ_l は非排水繰返しせん断中に経験した最大せん断ひずみに対応している。
- ・ 液状化後の非排水単調載荷試験による応力ひずみ関係を図6.2.4に示すが、有効応力がほぼゼロのときのせん断ひずみは、過去に経験した最大せん断ひずみ振幅 γ_{max} が大きいほど大きくなり、その増加率は相対密度が小さいほど大きくなることを示している。しかし、せん断応力の増加傾向は、有効応力がほぼゼロのときのせん断ひずみによらず平行になり、有効応力経路上ではせん断応力の立ち上がり部を除き、一本の線上（限界状態線, CSL）にのる。

上記のような液状化後の非排水単調載荷試験における応力ひずみ関係より、液状化による地盤剛性低下率を求め、その大変形を予測する試みも行われている。たとえば、Yasuda, et al. (1995) は、液状化後の非排水単調載荷（中空ねじり試験）における応力ひずみ関係（図6.2.5）において、原点から剛性回復が始まる点までのひずみ量を微小抵抗領域 γ_L と称し、その勾配（液状化後のせん断剛性率） G_L は、液状化前のせん断ひずみ0.1%における応力ひずみ関係の割線剛性 $G_{0.1}$ と比較して、約1/1,000以下になることを示した。また、図6.2.5に示すように、 γ_L の大きさは液状化の程度や試料の密度と密接な関係があることから、安田ら（1999）は、この関係を細粒分含有率およびN値によるせん断剛性率 G_N についても検討し、図6.2.6のような剛性低下率と F_L および細粒分含有率の関係を示した。また、このような液状化による剛性低下率を用いた液状化対象層の自重解析もしくは応力開放解析により、その側方流動量を簡便に求める手法を提案している。

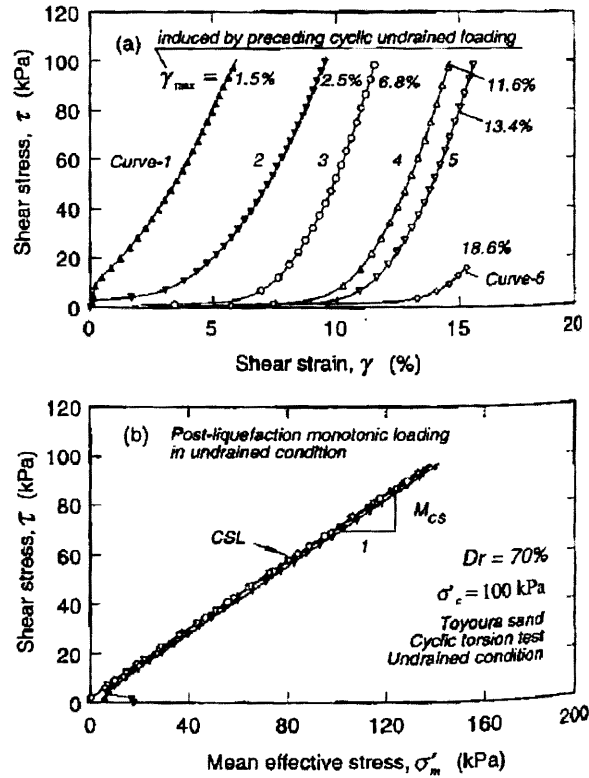


図6.2.4 液状化後に単調載荷したときの応力-ひずみ関係と有効応力経路 (Shamoto, et al.,1997)

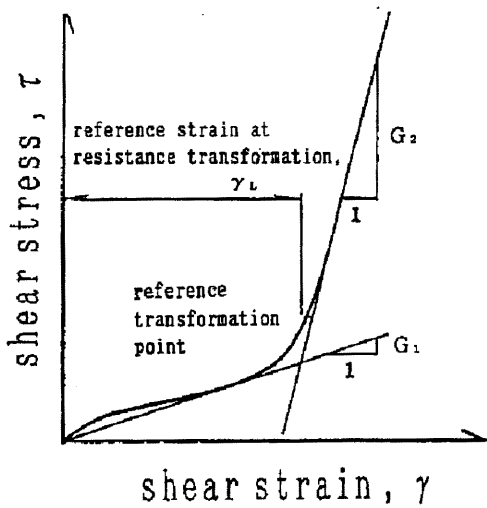


図6.2.5 微小変形領域と液状化後の剛性の定義
(Yasuda, et al., 1995)

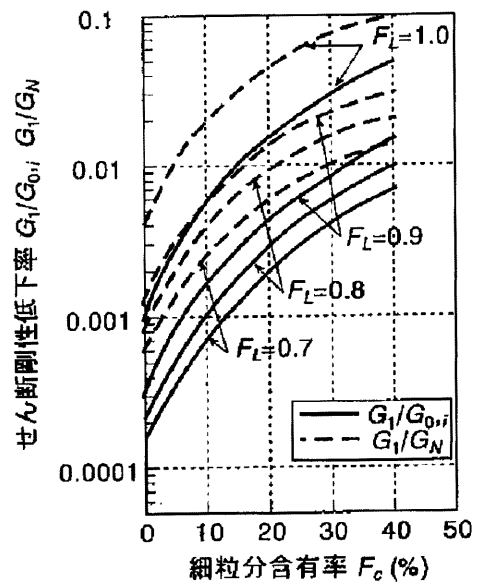


図6.2.6 液状化による地盤剛性の低下率
(安田ら, 1999)

6.2.4 液状化限界残留ひずみと補正N値に関する研究

原地盤の液状化強度を予測するにあたり、実務では標準貫入試験によるN値の使用が一般的となっている (e.g., 道路橋示方書 V耐震設計編、建築基礎構造設計指針)。標準貫入試験によるN値は、原地盤の相対密度、過圧密履歴、繰返しせん断履歴、および年代効果などの液状化強度に影響する要因を定性的に反映することから、室内試験結果の補完としては有用である。

Tokimatsu & Yoshimi (1983)は、任意の繰返しせん断応力比に対する供試体のせん断ひずみ振幅、および拘束圧と細粒分含有率の影響を考慮した補正N値との関係について、図6.2.7のようにまとめている。また、図6.2.7には1978年宮城県沖地震をはじめとする過去の地震によって被災したエリアの補正N値と繰返しせん断応力比の関係もプロットされているが、Tokimatsu & Yoshimi (1983)が実験結果を基に提案したせん断ひずみ両振幅5%のラインを境に、液状化が発生した地点と発生しなかった地点が分布している。

また、図6.2.8には、過去の地震の鉛直アレイ観測で得られた強震記録の解析から推定された地震時の地盤のせん断ひずみと補正N値の関係、および地震前後の航空写真測量や現地計測から得られた護岸近傍地盤の限界残留せん断ひずみと補正N値の関係 (時松, 1997) を示すが、図6.2.8 b)の結果は図6.2.7とよく対応しており、護岸近傍地盤の限界残留せん断ひずみが従来の室内試験の限界せん断ひずみと等価であることを示している。この関係より、時松(1997)は図6.2.7を拡張することにより、図6.2.9の補正N値、限界残留せん断ひずみ、およびせん断応力比の関係を得ている。

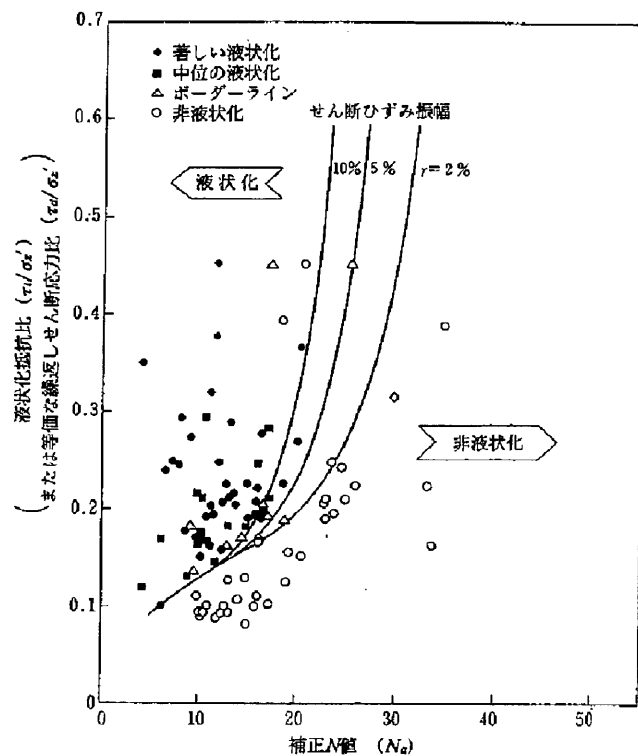


図6.2.7 補正N値による液状化判定 (時松, 1997 (Tokimatsu & Yoshimi, 1983に加筆))

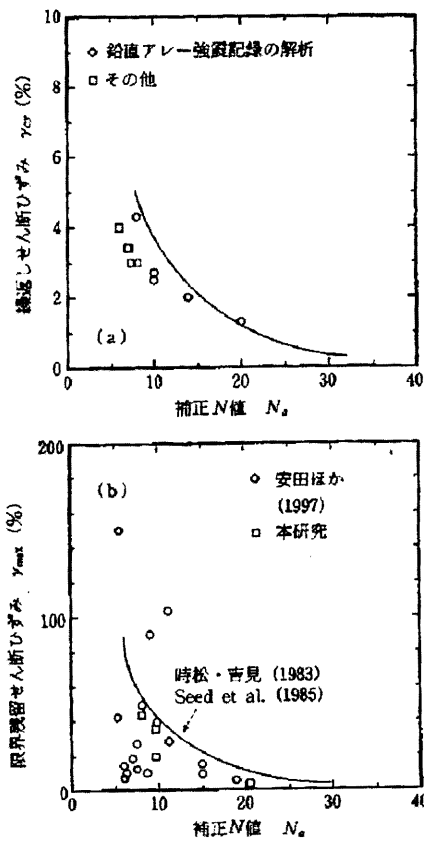


図6.2.8 強震記録解析による繰返しせん断ひずみ、航空写真と現地測量による限界残留ひずみと補正N値の関係（時松, 1997）

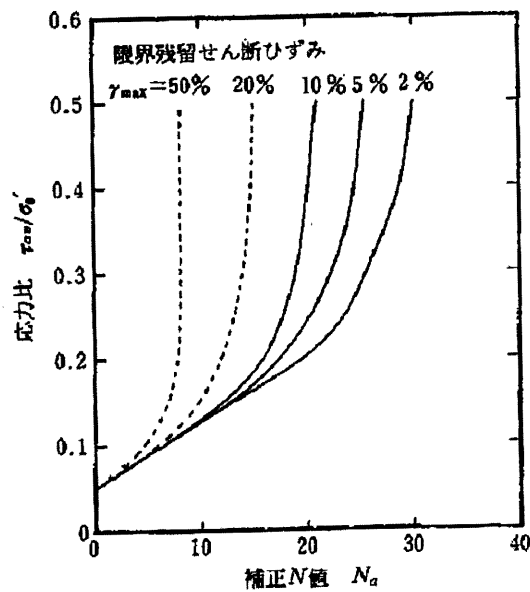


図6.2.9 補正N値、限界残留ひずみおよびせん断応力比の関係（時松, 1997）

6.3 大ひずみ振幅時のメンブレン張力補正

中空ねじり試験を精度良く実施するためには、適切なメンブレン張力の補正が不可欠である。従来、メンブレン張力補正は、その弾性係数から導かれる理論値（第2章参照）を利用してきた。本研究では、理論値がせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)} = 100\%$ 程度の大変形液状化試験にも適応可能か確認するため、写真6.3.1に示すように、内メンブレンと外メンブレン内部とセルを水で満たした状態で、非排水条件下の応力ひずみ関係を求めた。同様の手法でメンブレン張力の検討を実施した例として、Koseki et al. (2005)がある。なお、载荷は実際の試験と同様に軸ひずみ固定条件で実施した。また、繰返し回数を増す毎に、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ も10%、20%、40%、60%、80%、および100%のように、 $\gamma_{(DA)}$ を徐々に増やしながら実施した。

$\gamma_{(DA)} = 20\%$ までの結果を図6.3.1（写真6.3.2）に示す。図中にはメンブレンの弾性係数から導かれる理論値も示しているが、 $\gamma_{(DA)} = 20\%$ 程度までは実験結果は理論値と概ね一致する。しかし、図6.3.2（写真6.3.3）に示すように、 $\gamma_{(DA)} = 20\%$ 以上のひずみレベルでは $\gamma_{(DA)}$ の増加と共に実測値は非線形性を示し、 $\gamma_{(DA)} = 100\%$ （図6.3.3）では実測値と理論値の差がかなり大きくなっている。この原因の一つとして、写真6.3.3、写真6.3.4のように、ひずみが大きくなるとキャップとペDESTALに固定されたメンブレンが引っ張りにより緩んでくることが考えられる。このような現象は、ここで示した水供試体に限らず、実際の土試料でも確認される現象であること、およびこの実験は液状化による試料の大変形挙動を把握することを目的としていることから、本研究では、 $\gamma_{(DA)} = 100\%$ における実測値（図6.3.3）の近似式を用いてメンブレン張力の補正を実施した。



写真6.3.1 メンブレン張力補正試験に用いた水+メンブレン供試体

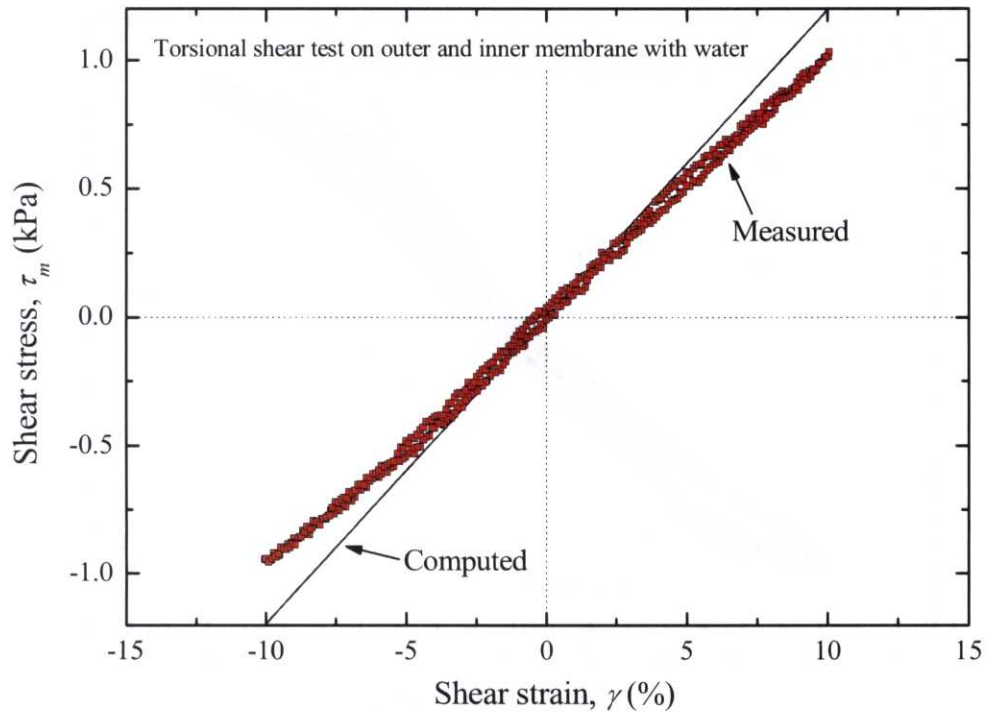


図6.3.1 水+メンブレン供試体の繰返し载荷によるせん断応力-せん断ひずみ関係 ($\gamma_{DA}=10\%, 20\%$)

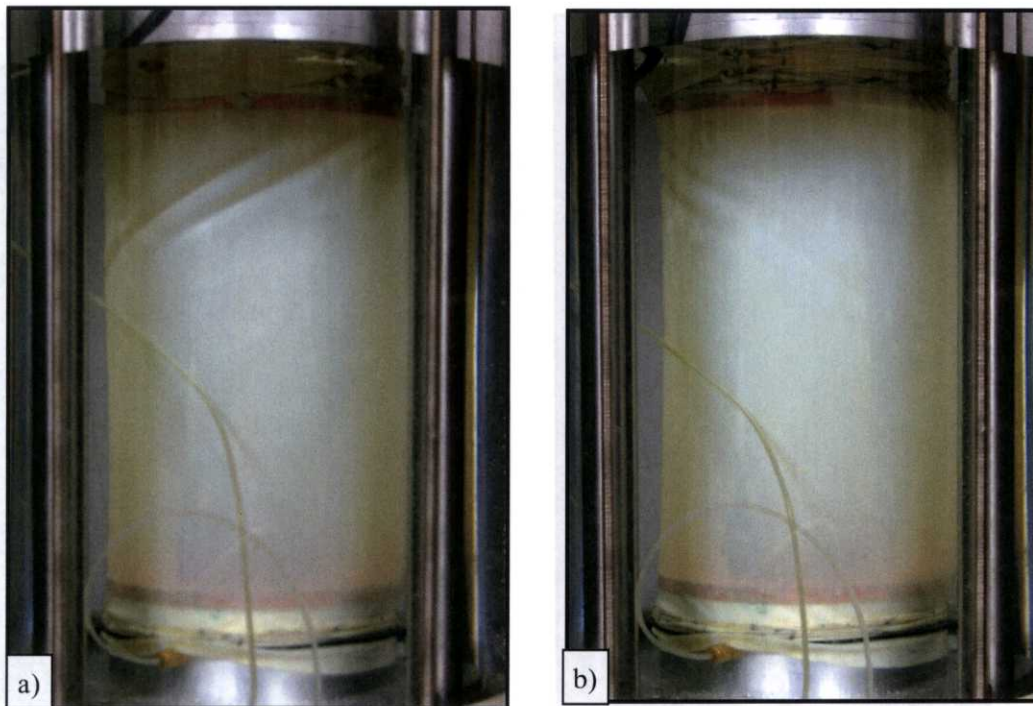


写真6.3.2 繰返しせん断中の水+メンブレン供試体 a) $\gamma=-10\%$, b) $\gamma=+10\%$

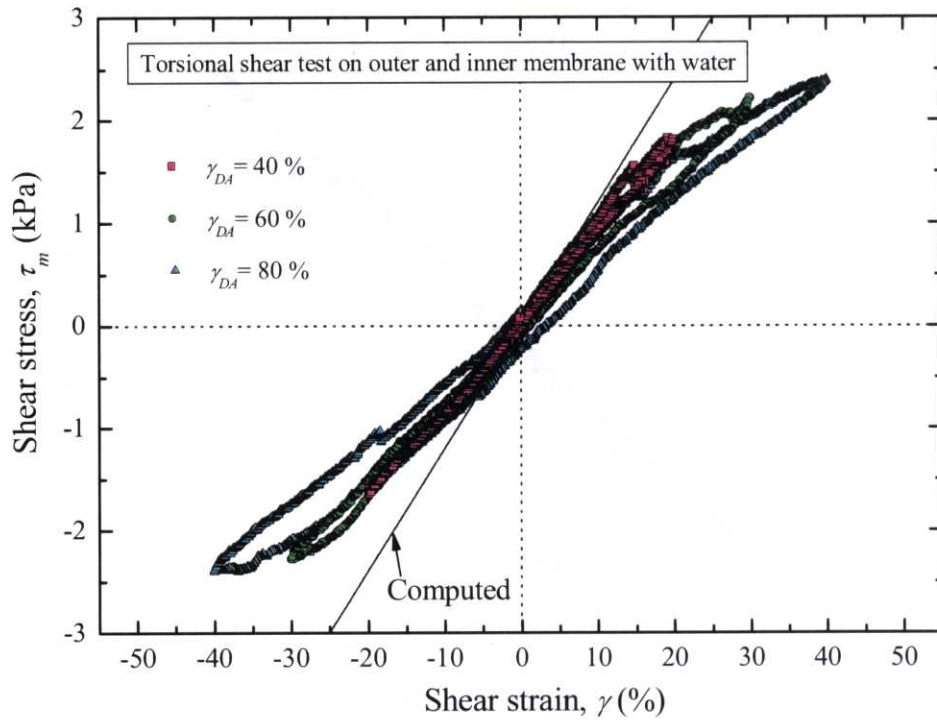


図6.3.2 水+メンブレン供試体の繰返し载荷によるせん断応力-せん断ひずみ関係 ($\gamma_{DA}=40\%$, 60% , 80%)

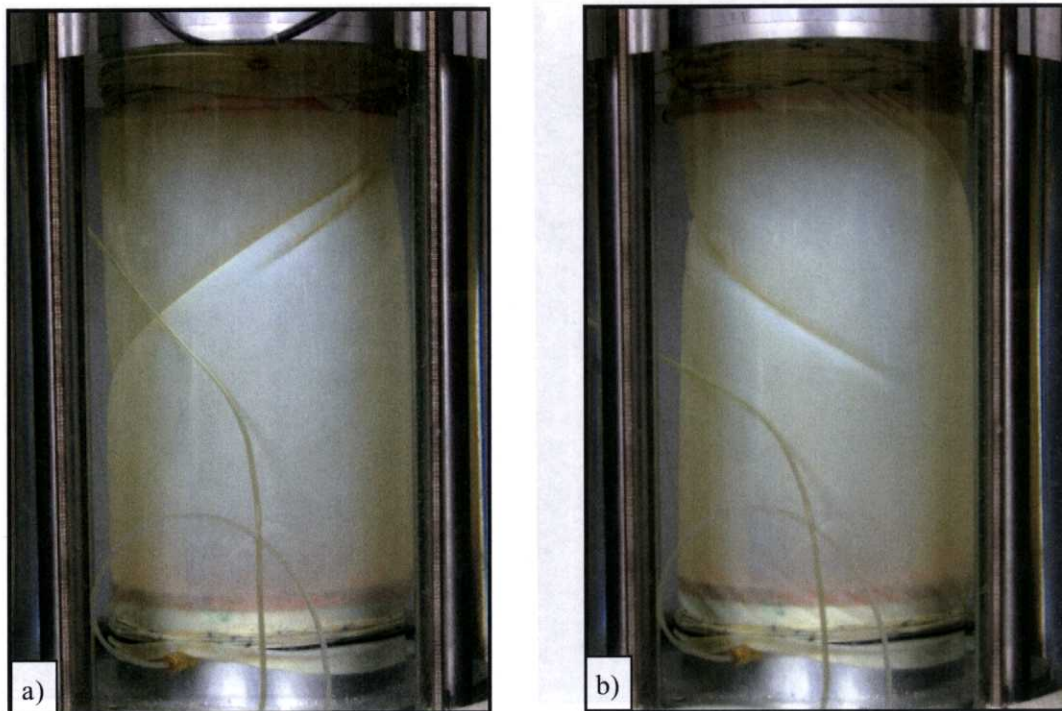


写真6.3.3 繰返しせん断中の水+メンブレン供試体 a) $\gamma = -30\%$, b) $\gamma = +30\%$

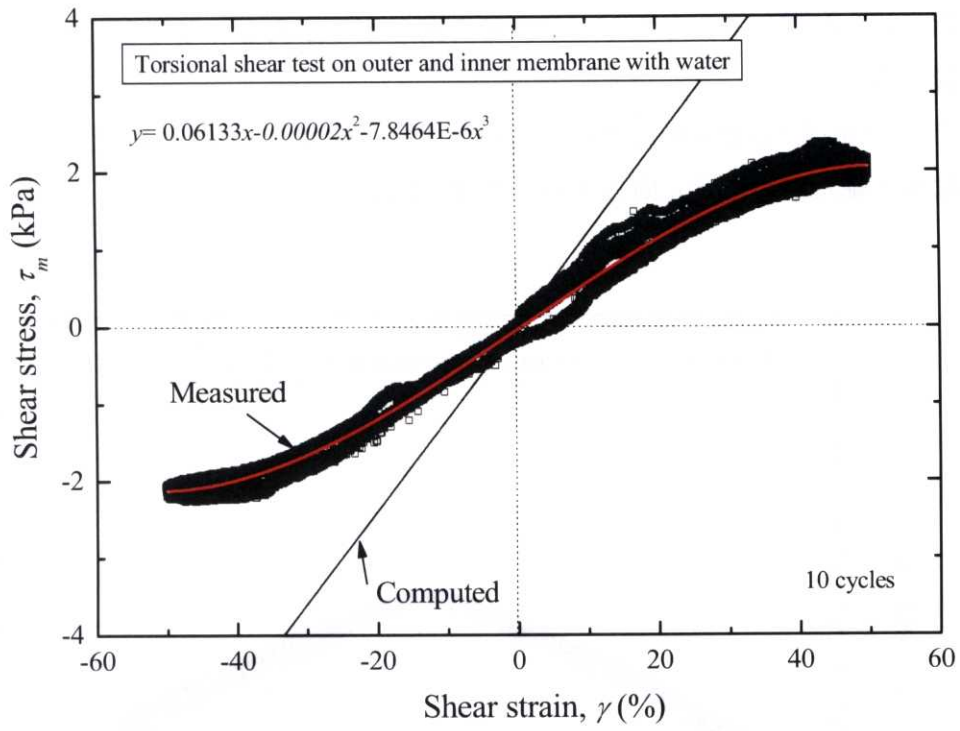


図6.3.3 水+メンブレン供試体の繰返し荷重によるせん断応力-せん断ひずみ関係 ($\gamma_{DA} = 100\%$)

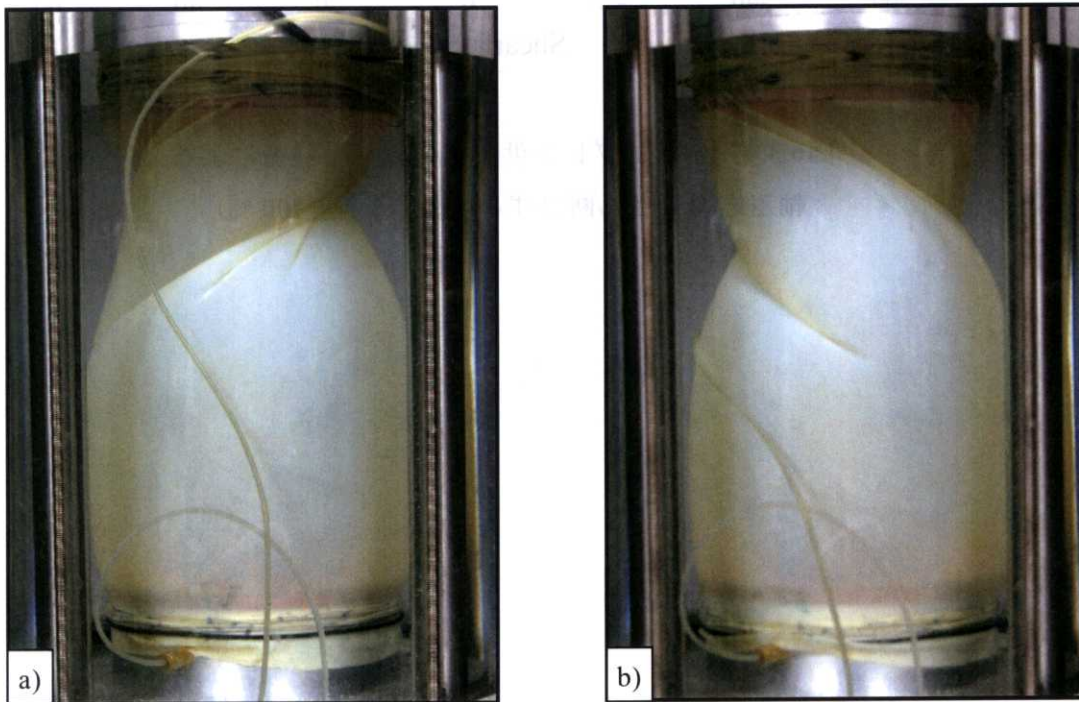


写真6.3.4 繰返しせん断中の水+メンブレン供試体 a) $\gamma = -50\%$, b) $\gamma = +50\%$

今回実施した中型中空ねじり試験機による液状化試験では、繰り返し载荷中の軸変位は固定された状態で行われている。したがって、せん断ひずみが大きくなると、メンブレン力は軸応力にも影響を及ぼす。

参考までに、図6.3.3のせん断応力とせん断ひずみの関係と、写真6.3.4に対応する、水+メンブレン供試体の軸差応力とせん断ひずみの関係を図6.3.4に示す。

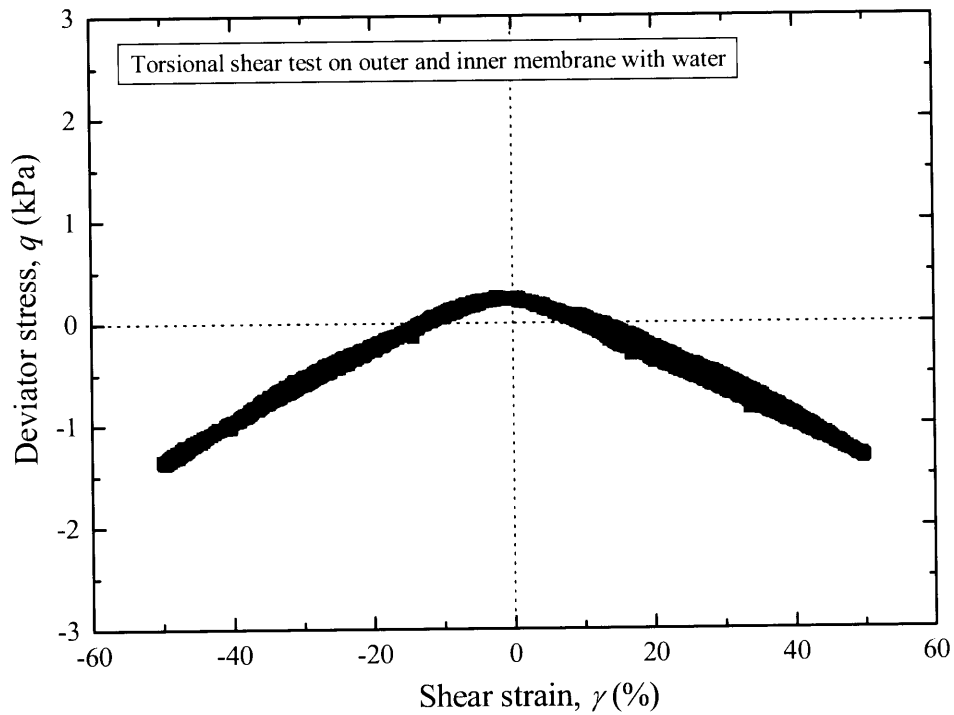


図6.3.4 水+メンブレン供試体の繰り返し载荷による
軸差応力-せん断ひずみ関係 ($\gamma_{DA} = 100\%$)

6.4 豊浦砂による大ひずみ液状化試験

中型中空ねじり試験機による大ひずみ液状化試験の基礎的な資料を得るため、空中落下法によって密度を変化させた豊浦砂試料において一連の実験を実施した。

豊浦砂による実験では、 $p' = 100$ kPaまで等方圧密後、所定の繰返しせん断応力を非排水条件で与えた。また、繰返し載荷は、軸ひずみ固定条件でせん断ひずみ一定 ($\dot{\gamma} = 5.5$ %/min) 条件下で行われた。なお、一部の試料では、液状化試験前に動的せん断剛性率を計測している。

6.4.1 液状化試験における供試体の挙動

(1) 非常に緩い供試体 (*very loose*)

非常に緩い供試体の代表的な試験結果として、図6.4.1にHcToy-6 ($D_r = 26.6$ %) の有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。また、図中にプロットした各点において撮影された供試体の様子を写真6.4.1に示す。供試体観察を容易にするため、メンブレンに格子を書き込んでいるが、その間隔は2 cmである。HcToy-6については、設定したせん断応力が供試体密度に対し大きい値であったため、1波目の載荷によって有効応力が急激に低下する様子が伺える。この1波目の有効応力の低下により、せん断ひずみは約10 %生じた (図6.4.1 b), 点1)。その後、有効応力経路は*cyclic mobility*の状態となったが、所定のせん断応力に達するまでの変形は概ね一様であった (図6.4.1 b), 点2)。しかし、除荷後の点3付近において、メンブレンに多数のしわが発生し、供試体上部を中心に収縮する現象が観察された。このような現象は、図6.4.2, 写真6.4.2に示した別の試料 (HcToy-7, $D_r = 25.4$ %) においても観察されている。

メンブレンにしわが発生した後も繰返し載荷を継続させると、最終的にせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ は100 %を超える。また、最終的な供試体の変形は写真6.4.1および写真6.4.2に示すように供試体上部を中心に、多数のしわを伴った変形が発達する様子が観察された。

その他の非常に緩い試料によって実施された、異なるせん断応力比 τ_d/σ'_m による液状化試験結果を図6.4.3, 図6.4.4に示す。非常に緩い試料における共通的な傾向として、液状化試験初期段階ではひずみはほとんど生じていないが ($\gamma_{(DA)} < 0.5$ %), 有効応力が10~20 kPa程度、もしくは破壊線 (変相線) 付近まで低下すると、せん断ひずみが急激に増加する傾向が挙げられる。また、せん断ひずみが急激に増加してせん断応力が所定の値に達するまでは、供試体は概ね一様な変形を呈するが、除荷されると供試体にはしわが発生する傾向が認められた。その他、せん断ひずみが一度増加すると比較的容易に大変形にまで達する傾向も確認された。この現象は、所定のせん断ひずみ振幅に達するまでの繰返し載荷回数 (表6.4.1) にも表れており、各試料とも $\gamma_{(DA)} = 4.5$ %における繰返し回数と、100 %における繰返し回数との差は非常に小さい。

なお、 $\gamma_{(DA)} = 4.5$ %を用いた理由は、第5章で示した三軸試験による液状化強度を $\varepsilon_{v(DA)} = 3$ %で規定したためであり、軸ひずみ $\varepsilon_r = 3$ %を非排水条件においてせん断ひずみ γ に換算した値に相

当する。

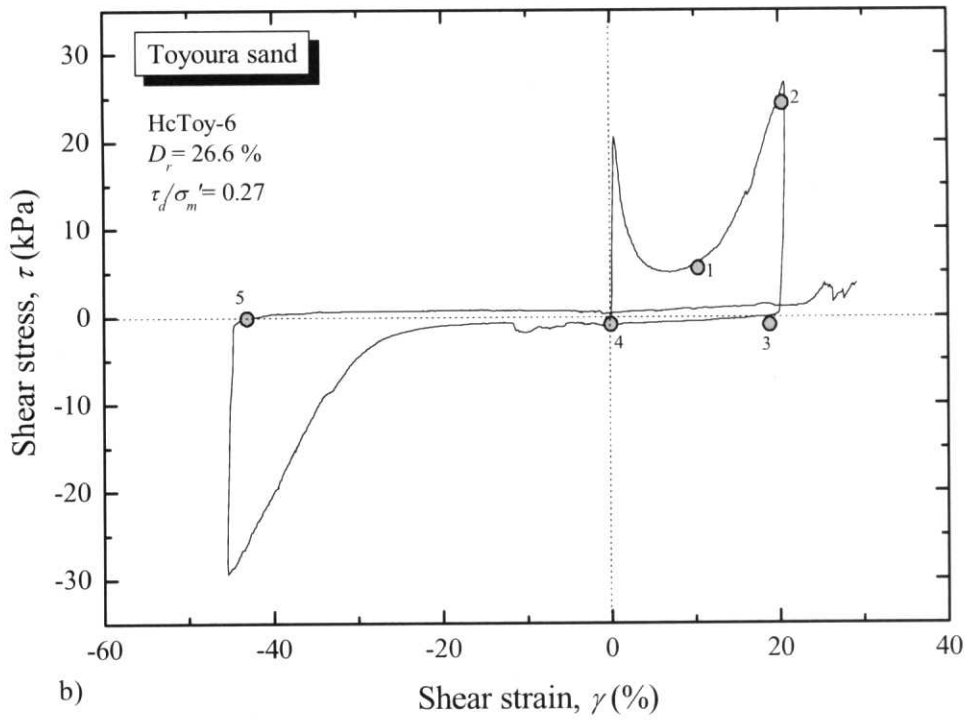
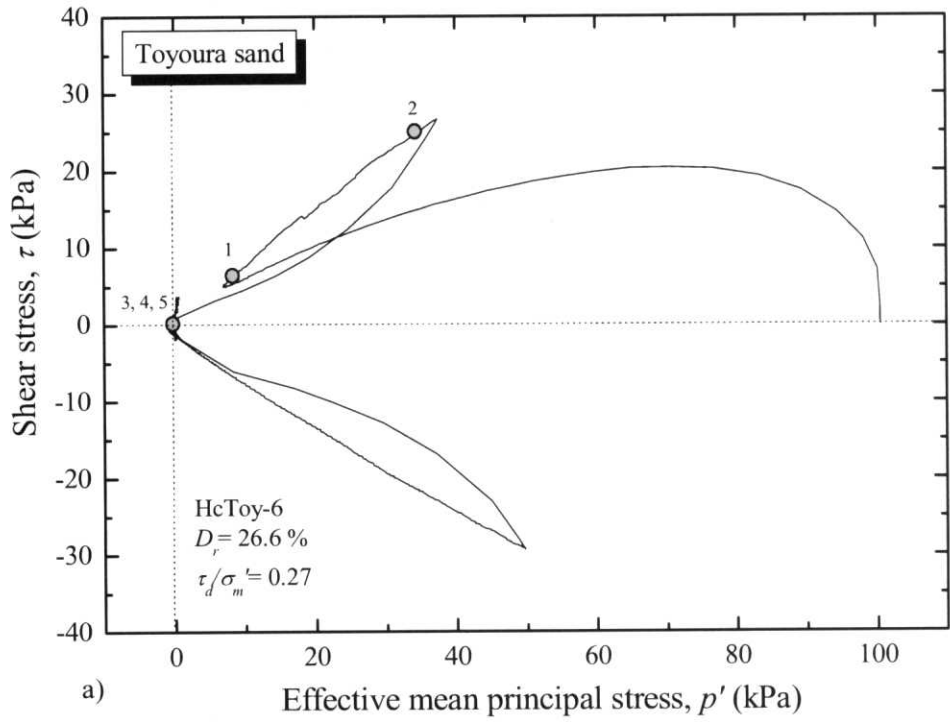
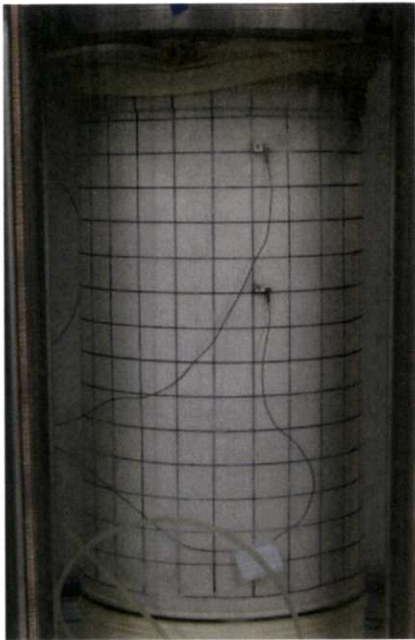


図6.4.1 非常に緩い供試体 (HcToy-6) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前



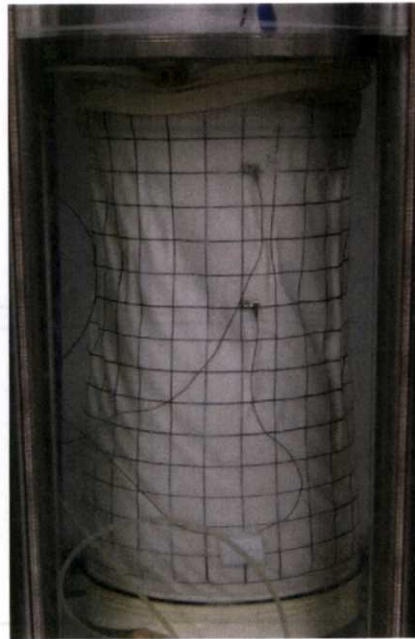
1: $\gamma = 10\%$
供試体の変形は概ね一様。



2: $\gamma = 20\%$
供試体の変形はS字型を呈する。中心部の変形は概ね一様。



3: $\gamma = 19\%$
2の除荷後の様子。供試体全体に大きなしわが約 45° に入り、供試体上部が若干収縮。



4: $\gamma = 0\%$
3の除荷後の様子。試料は全体的に沈下するが、キャップは不動のため、供試体形状は下膨れになる。



5: $\gamma = -43\%$
逆振りの除荷後の様子。供試体上部に深いしわが入り、収縮する。しわが入る瞬間はセル水が波立つほどの振動

写真6.4.1 非常に緩い供試体 (HcToy-6) の液状化試験中の様子

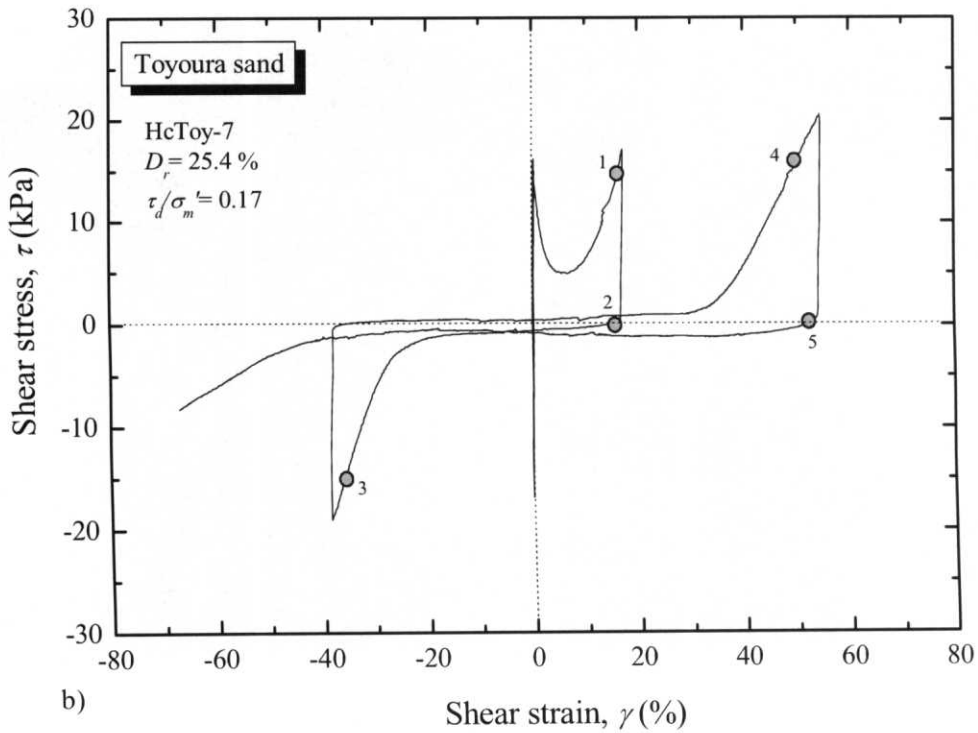
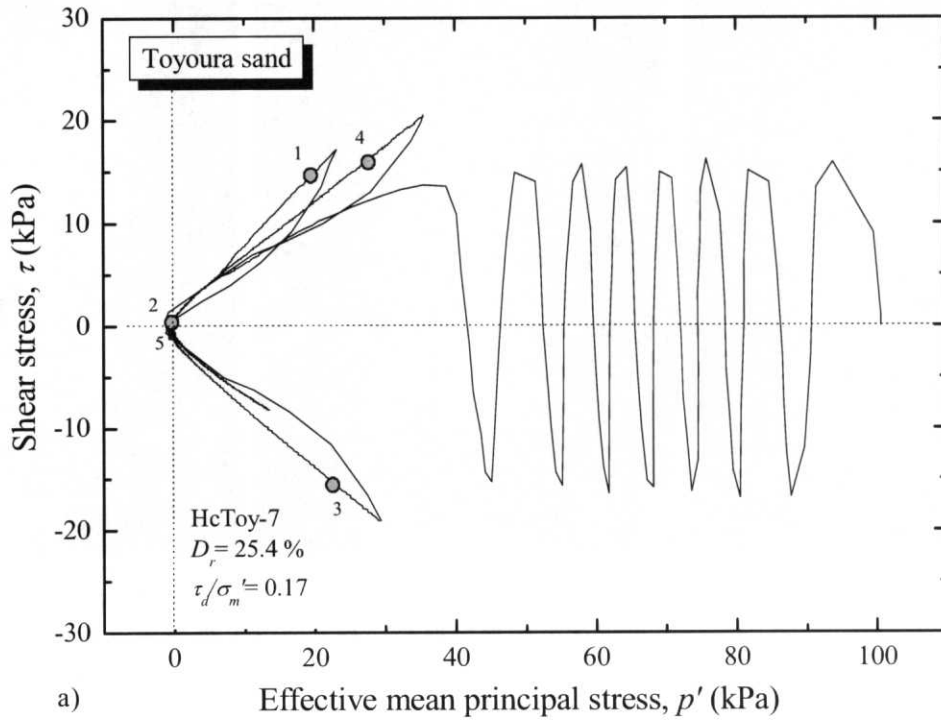


図6.4.2 非常に緩い供試体 (HcToy-7) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



1: $\gamma = 15\%$

供試体の変形はS字型を呈する。中心部の変形は概ね一様。



2: $\gamma = 18\%$

1の除荷後の様子。供試体上部を中心に大きなしわが約 45° に入り、若干収縮。



3: $\gamma = -35\%$

供試体中心部を境に変形の程度が異なっており、下部よりも上部の方が変形は大きい。



4: $\gamma = 50\%$

変形は供試体上部で大きく生じている。



5: $\gamma = 53\%$

4の除荷後の様子。供試体上部が大きくねじれ、収縮する。供試体形状は下膨れ。



試験終了後 $\gamma = -65\%$

供試体下部よりも上部の変形が大きい。キャップに留められたメンブレンが引張られている様子が認められる。

写真6.4.2 非常に緩い供試体 (HcToy-7) の液状化試験中の様子

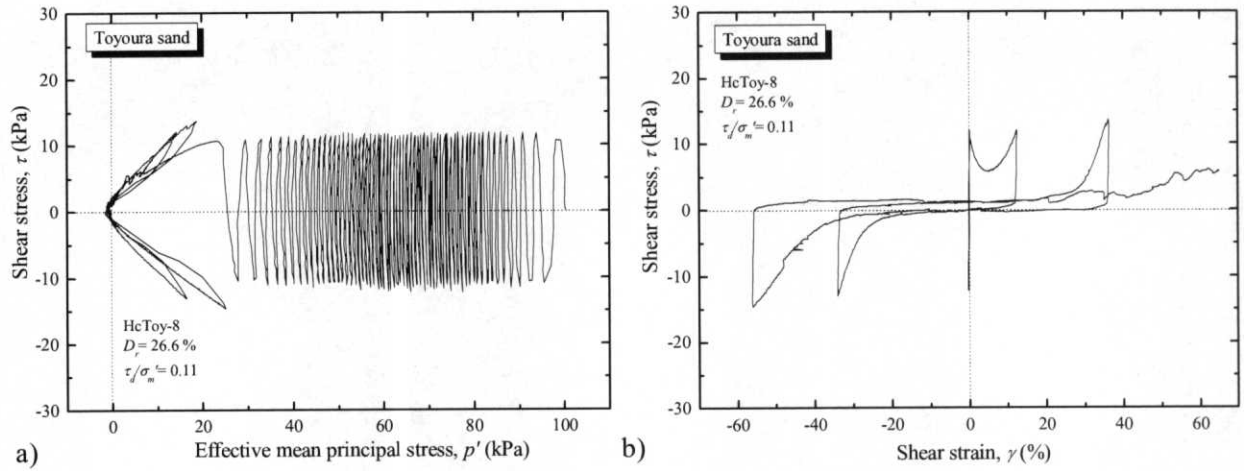


図6.4.3 非常に緩い供試体 (HcToy-8) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

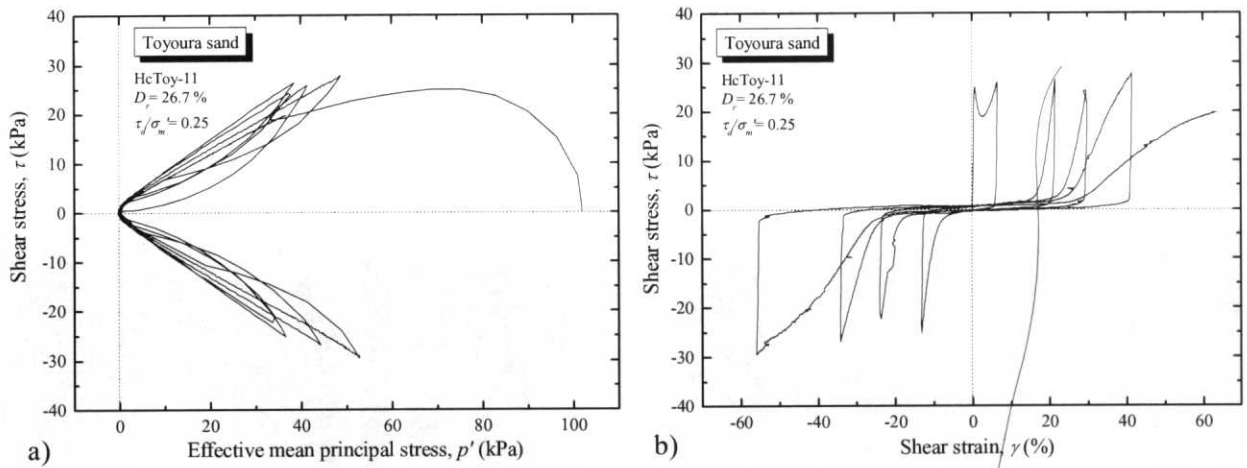


図6.4.4 非常に緩い供試体 (HcToy-11) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

表 6.4.1 非常に緩い豊浦砂の液状化試験結果

No.	D_r (%)	τ_d/σ'_m	繰り返し回数 N_c				
			$\gamma_{(DA)} = 4.5\%$	$\gamma_{(DA)} = 10\%$	$\gamma_{(DA)} = 30\%$	$\gamma_{(DA)} = 60\%$	$\gamma_{(DA)} = 100\%$
HcToy-6	26.6	0.27	0.1	0.25	0.61	0.61	1.5
HcToy-7	25.4	0.17	7.1	7.3	7.7	8.1	8.6
HcToy-8	26.6	0.11	63	63	63	64	65
HcToy-11	26.7	0.25	0.3	0.65	1.4	2.9	4

(2) 緩い供試体 (*loose*)

緩い供試体の代表的な試験結果として、図6.4.5にHcToy-10 ($D_r = 40.7\%$)の有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。また、図6.4.5にプロットした各点において撮影された供試体の様子を写真6.4.3に示す。HcToy-10については、*cyclic mobility*に達するまでに21回の繰返し載荷を要したが、この間のせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ は0.5%程度であった。その後の*cyclic mobility*の発生と共にせん断ひずみが大きくなったが、このような傾向は前述の非常に緩い試料の結果と対応している。*Cyclic mobility*発生後の除荷時(図6.4.5 b)、点2)において、メンブレンにしわが発生した。非常に緩い試料で発生したしわの状態と比較すると、緩い試料では細く、本数は少ないものの、比較的明瞭に現れている。また、しわの発生に伴う供試体の収縮の程度は、非常に緩い試料と比較して小さい。

供試体変形について、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)} = 40\%$ 程度までは概ね一様であった(図6.4.5 b)、点3)。しかし、繰返し載荷を継続していくと、 $\gamma_{(DA)}$ は約100%に達するが、供試体の変形は上部付近に集中する傾向を呈する。これはHcToy-10の場合、せん断応力が負の時により顕著であり、その様子は図6.4.5 b)に示す点4および点5の写真による比較で観察できる。

その他の緩い試料によって実施された、異なるせん断応力比 τ_d/σ'_m による液状化試験結果を図6.4.6、図6.4.7に示す。これらの応力-ひずみ関係(図6.4.6 a)、図6.4.7 a)によると、繰返し回数と共にせん断ひずみは増加するが、 $\gamma_{(DA)} = 40\%$ 程度になるとせん断ひずみ増分が小さくなり、更に繰返し載荷を継続すると、再度せん断ひずみの増分が大きくなる傾向が認められた。図6.4.5 a)のHcToy-10試料においても、他の試料ほど明確ではないが同様の傾向が認められる。このせん断ひずみ増分傾向の変化する境界前後の供試体観察より、せん断ひずみ増分が小さくなる過程では供試体の変形は概ね一様であるが、増分が大きくなる過程では、供試体は完全に変形が局所化した状態に至っている。この様子は、写真6.4.3における点1と点4、および点3と点5との比較により確認できる。

また、所定の $\gamma_{(DA)}$ に達するまでの繰返し載荷回数を表6.4.2に示すが、非常に緩い試料の結果と比較すると、 $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ における繰返し回数と、100%における繰返し回数との差は若干大きくなっている。

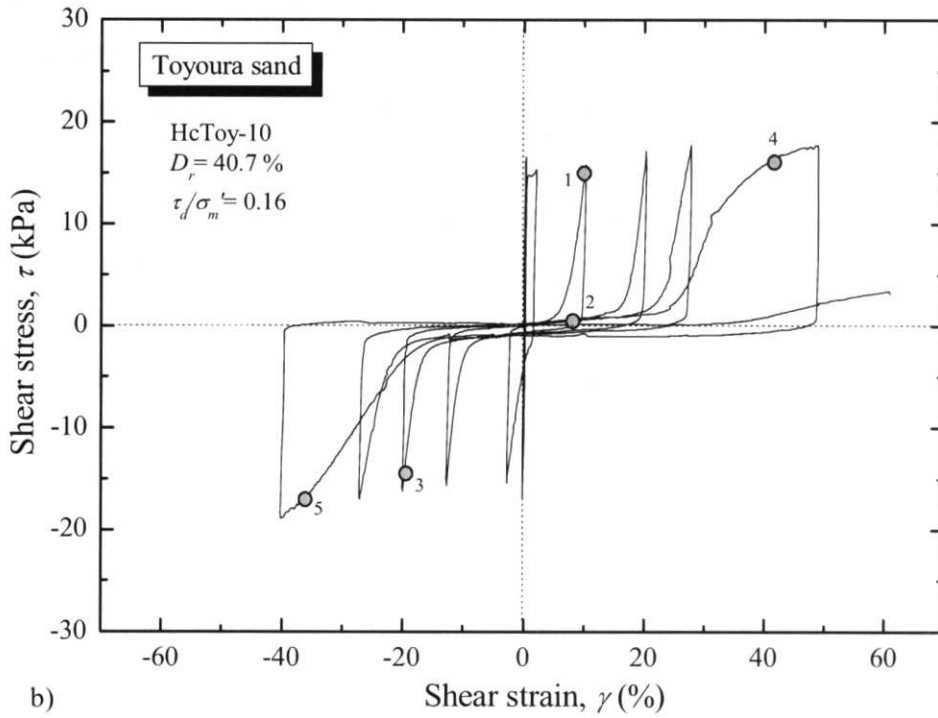
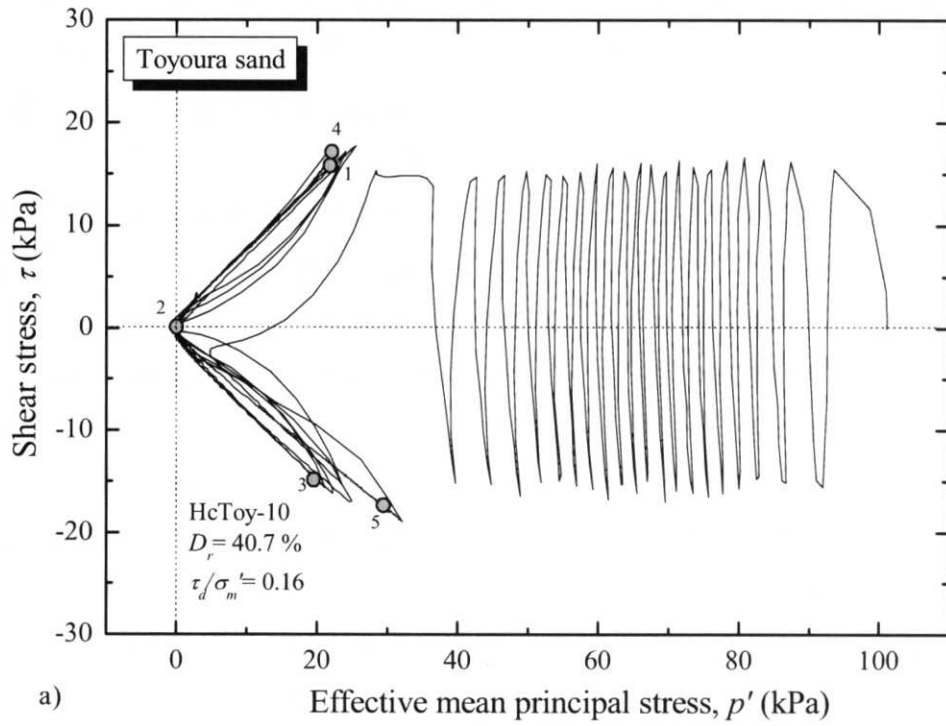
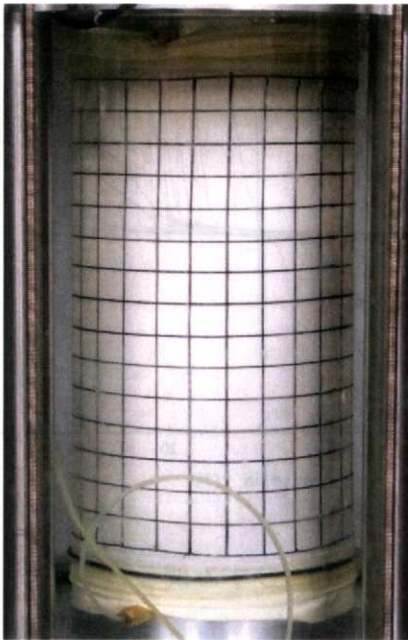


図6.4.5 緩い供試体 (HcToy-10) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前



1: $\gamma = 10\%$

供試体の変形は概ね一様である。



2: $\gamma = 8\%$

1の除荷後、供試体全体に数本のしわが約 45° に入る。しわの幅は非常に緩い試料と比べて細い。



3: $\gamma = -20\%$

2の反対方向にも、しわが発達。供試体上部と下部に変形の局所化が認められる。



4: $\gamma = 40\%$

繰返しによりしわが増えると共に供試体が若干収縮する。供試体全体が変形するが、上部の方が大きい。



5: $\gamma = -36\%$

4の逆振りの様子。4よりも供試体の変形は上部に集中している。

写真6.4.3 緩い供試体 (HcToy-10) の液状化試験中の様子

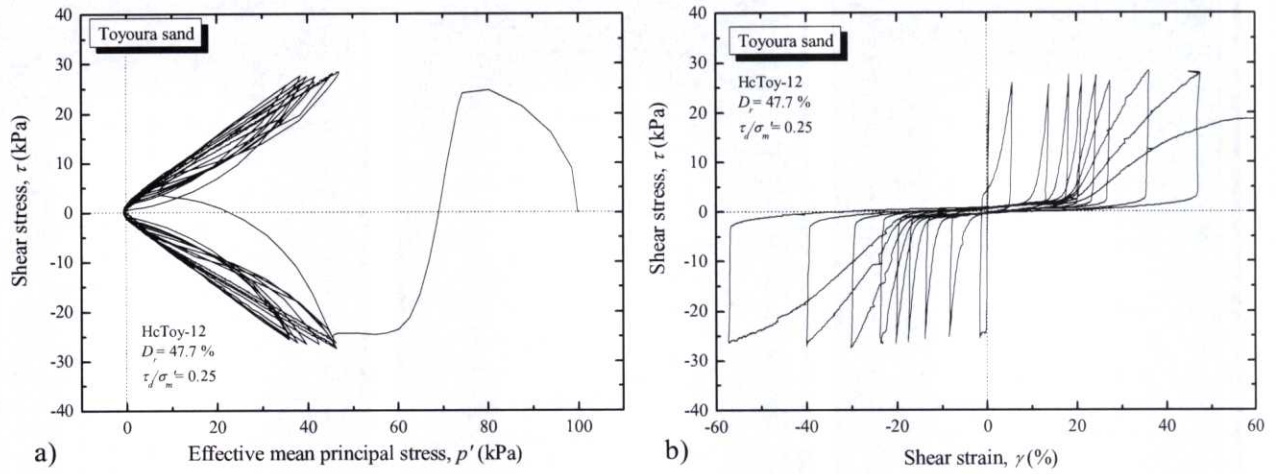


図6.4.6 緩い供試体 (HcToy-12) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

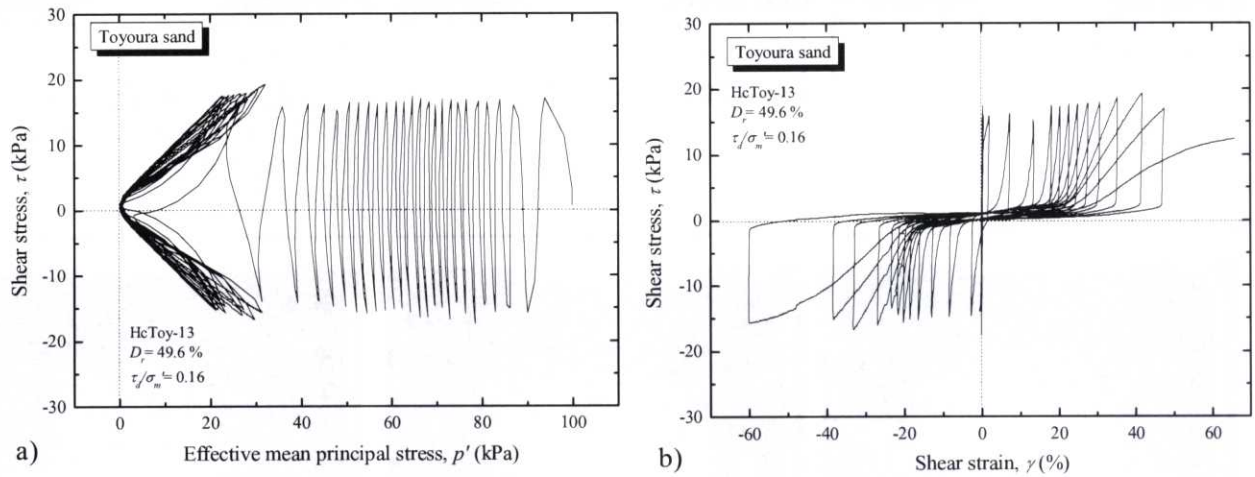


図6.4.7 緩い供試体 (HcToy-13) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

表 6.4.2 緩い豊浦砂の液状化試験結果

No.	D_r (%)	τ_d/σ'_m	繰返し回数 N_c				
			$\gamma_{(DA)} = 4.5\%$	$\gamma_{(DA)} = 10\%$	$\gamma_{(DA)} = 30\%$	$\gamma_{(DA)} = 60\%$	$\gamma_{(DA)} = 100\%$
HcToy-10	40.7	0.16	11	22	23	25	26
HcToy-12	47.7	0.25	1.2	1.7	3.3	7.2	8.9
HcToy-13	49.6	0.16	25	26	28	34	36

(3) 中密供試体 (*medium dense*)

中密供試体の代表的な試験結果として、図6.4.8にHcToy-5 ($D_r = 64.5\%$) の有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。また、図6.4.8 b)の応力-ひずみ関係にプロットした各点において撮影された供試体の様子を写真6.4.4に示す。HcToy-5については、*cyclic mobility*に達するまでに11回の繰返し載荷を要したが、この間のひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ は約1%以下であった。その後の*cyclic mobility*の発生と共にせん断ひずみが大きくなったが、このような傾向は前述の非常に緩い試料および緩い試料の結果と対応している。また、*cyclic mobility*発生後、せん断ひずみは増加傾向にあるが、比較的小さなひずみレベル(図6.4.8 b), 点1, 2)では供試体の変形は概ね一様である。

供試体の変形について、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ が増加していくと、しわの発達と共に、供試体上部に変形が集中する傾向が認められる(図6.4.8 b), 点3, 4)。HcToy-5における最終的な $\gamma_{(DA)}$ は35%程度であったが、非常に緩い試料および緩い試料と比較して、供試体の変形は上部に集中する傾向が確認された(図6.4.8 b), 点5)。また、中密供試体でも緩い供試体と同様、せん断ひずみ増分傾向の変化が、 $\gamma_{(DA)} = 20 \sim 30\%$ 付近において確認された。

その他の緩い試料によって実施された、異なるせん断応力比 τ_d/σ'_m による液状化試験結果を図6.4.9, 図6.4.10に示す。また、所定の $\gamma_{(DA)}$ に達するまでの繰返し載荷回数を表6.4.2に示すが、非常に緩い試料、および緩い試料の結果と比較すると、 $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ における繰返し回数と、100%における繰返し回数との差は若干大きくなっている。

なお、一部の中密供試体では、最終的な $\gamma_{(DA)}$ が20~35%程度で実験が終了しているが、これは実験途中で不具合(ケーブル脱落)が生じたためである。

表 6.4.3 中密な豊浦砂の液状化試験結果

No.	D_r (%)	τ_d/σ'_m	繰返し回数 N_c				
			$\gamma_{(DA)} = 4.5\%$	$\gamma_{(DA)} = 10\%$	$\gamma_{(DA)} = 30\%$	$\gamma_{(DA)} = 60\%$	$\gamma_{(DA)} = 100\%$
HcToy-2	58.6	0.33	1.1	2.7	-	-	-
HcToy-4	60.7	0.37	1.2	2.6	9	10	11
HcToy-5	64.5	0.27	13	15	23	-	-

- : ケーブル脱落

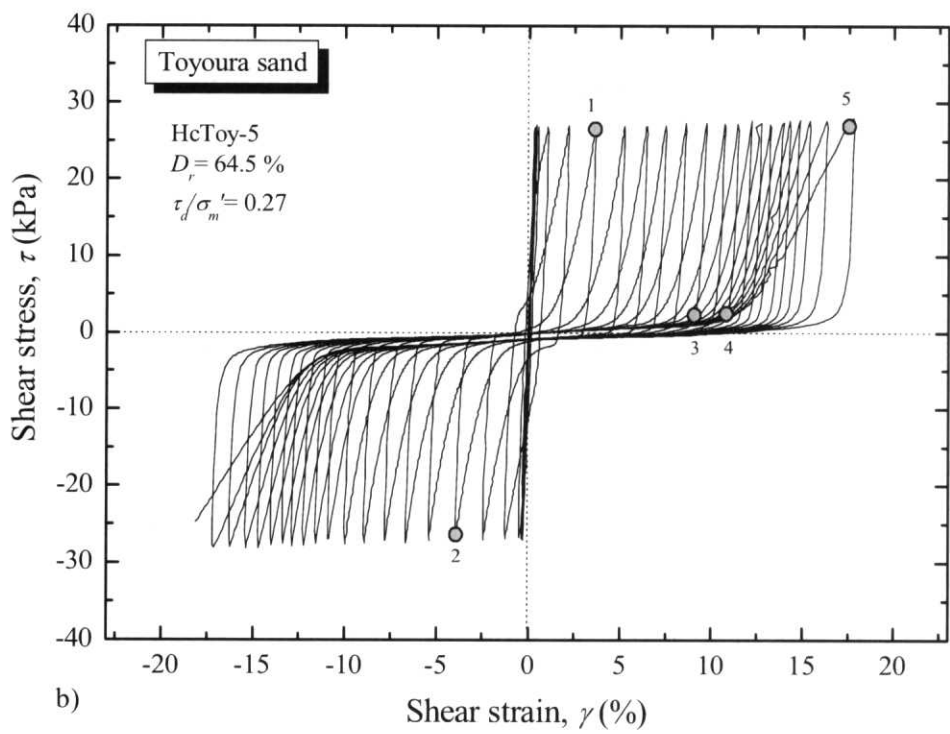
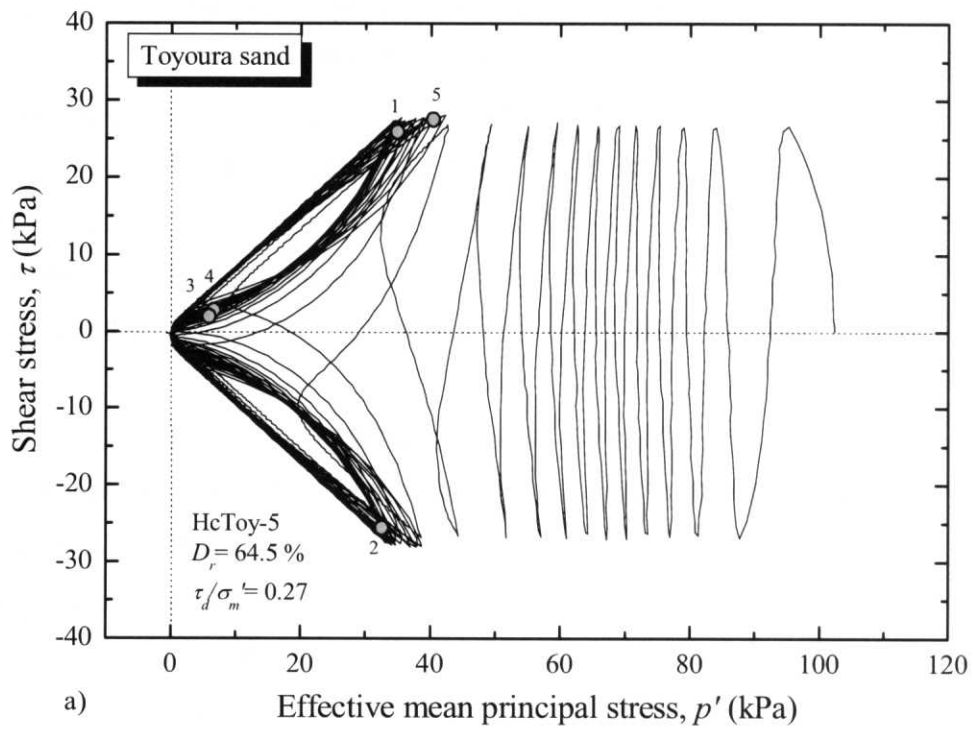
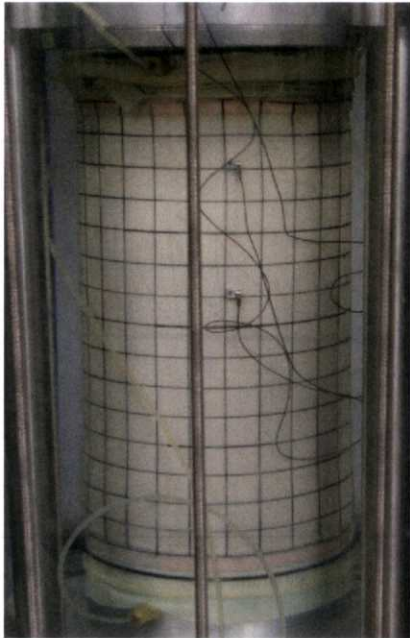
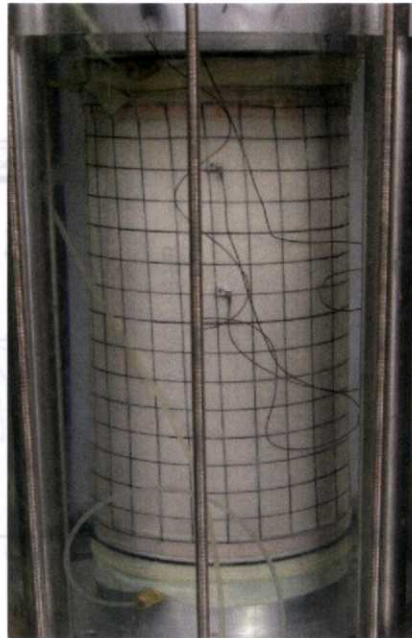


図6.4.8 中密供試体 (HcToy-5) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



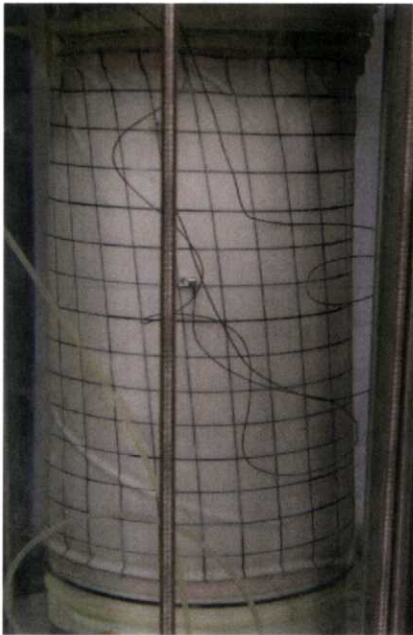
液状化試験前



1: $\gamma = 3.5\%$
供試体の変形は概ね一様。



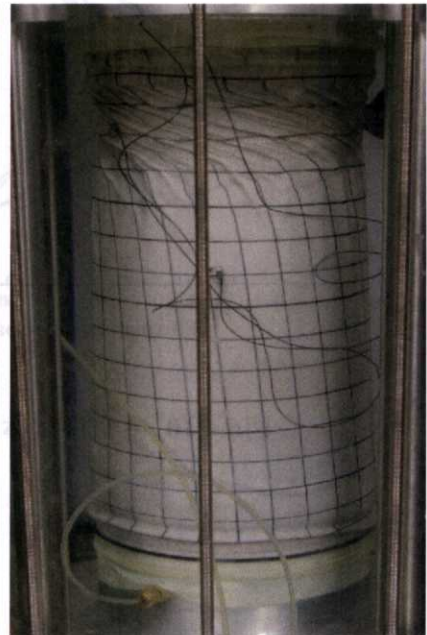
2: $\gamma = -4\%$
1 の逆振りの様子。供試体の変形は概ね一様であるが、若干 S 字型となる。



3: $\gamma = 9\%$
剛性回復後の除荷時の様子。供試体上部端面に変形の局所化が認められる。下部に比較的大きなしわが発達。



4: $\gamma = 11\%$
剛性回復後の除荷時の様子。供試体上部端面の変形局所化が大きくなる。ベDESTAL 付近のしわも大きくなる。



5: $\gamma = 18\%$
せん断変形が供試体上部約 30% に変形が集中。

写真6.4.4 中密供試体 (HcToy-5) の液状化試験中の様子

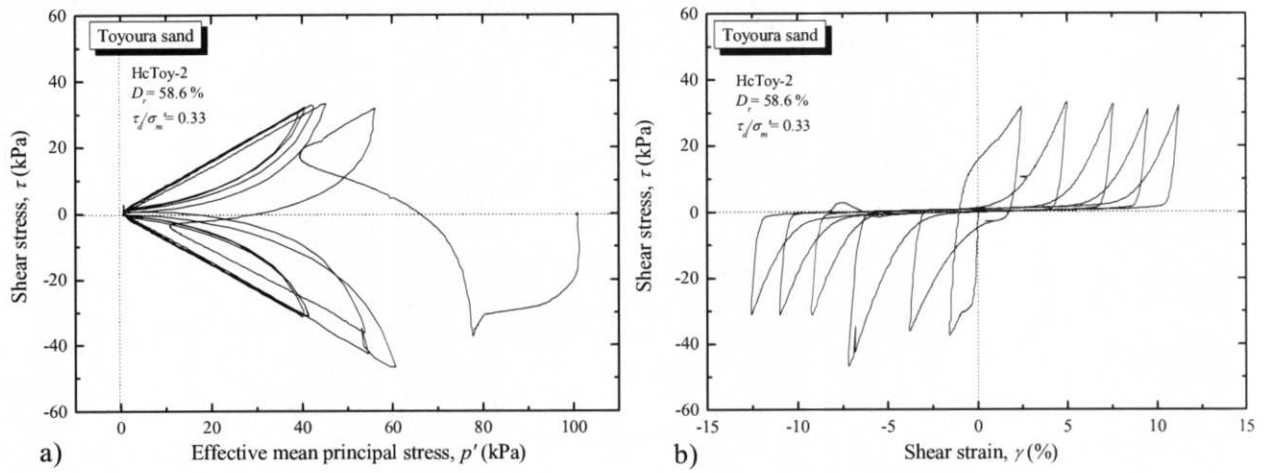


図6.4.9 中密供試体 (HcToy-2) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

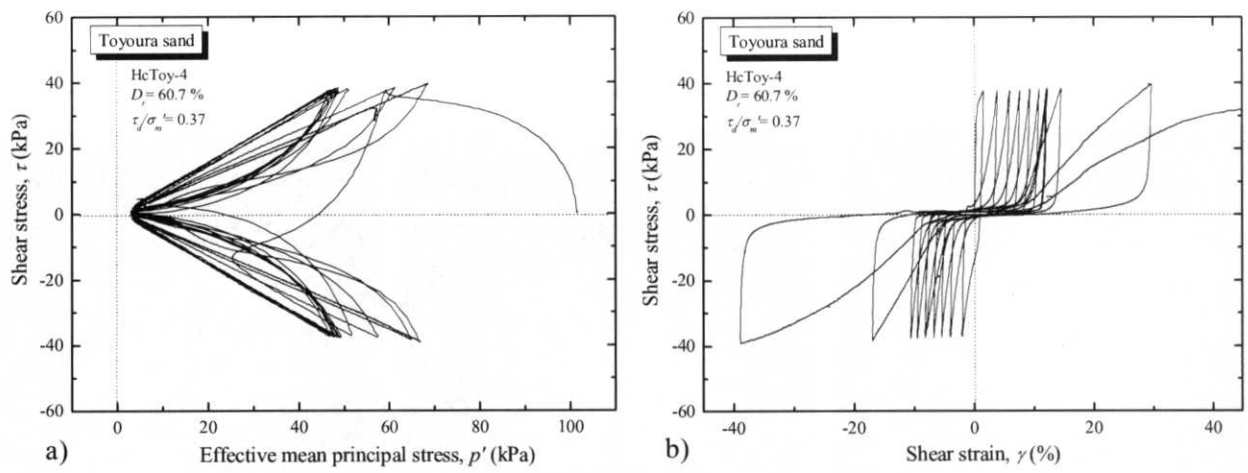


図6.4.10 中密供試体 (HcToy-4) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

6.4.2 大ひずみレベルにおける液状化強度

大ひずみ液状化試験による豊浦砂の液状化強度曲線を図6.4.11～図6.4.13に示す。また、各試料の液状化強度 R_{L15} （所定のせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ に至るまでの繰返し回数 $N_c=15$ で定義した液状化強度）と、液状化試験直前（ $p'=100$ kPa）に計測した初期動的せん断剛性率 G_{d0} の結果を表6.4.4に示す。

供試体の密度別の液状化強度曲線より、非常に緩い試料では、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ の違いによる液状化強度曲線の変化は非常に小さい（図6.4.11）。一方、緩い供試体では $\gamma_{(DA)}=4.5\%$ と 10% の差はいずれもフラットな状態で R_{L15} の差も小さいが、 $\gamma_{(DA)}=60\%$ の液状化強度曲線は比較的右側に立った状態で分布する（図6.4.12）。また、中密試料の結果については、 $\gamma_{(DA)}$ の値が大きくなるほど液状化強度曲線も立ち上がる傾向を呈し、 R_{L15} についても $\gamma_{(DA)}=4.5\%$ と 60% の差は、非常に緩い試料および緩い試料と比較して差が大きくなっている。

このような傾向は、液状化の程度が密度に依存する従来の傾向を示している。すなわち、非常に緩い試料では、間隙水圧の上昇により一度せん断ひずみが増加すると、急激に変形に至る傾向にあり、一方中密試料では、せん断ひずみは徐々に増加する傾向があることを示唆している。

第5章において、液状化強度 R_{L15} は液状化直前に計測した初期微小変形特性（特に動的せん断剛性率 G_{d0} ）と良い相関があることを示したが、この傾向は大ひずみ中空ねじり試験においても同様である。図6.4.14に G_{d0} と所定の $\gamma_{(DA)}$ に対応する R_{L15} との関係を示すが、 G_{d0} の増加と共に R_{L15} の値も増加する傾向が認められる。

表 6.4.4 大ひずみ液状化試験による豊浦砂の液状化強度と初期動的せん断剛性率

試料名	Test No.	平均 D_r (%)	液状化強度 R_{L15}			G_{d0} (MPa) (試料 No.)
			$\gamma_{(DA)}=4.5\%$	$\gamma_{(DA)}=10\%$	$\gamma_{(DA)}=60\%$	
Very Loose	HcToy-6, 7, 8, 11	26.3	0.14	0.14	0.15	62.7 (Toy-11)
Loose	HcToy-10, 12, 13	46.0	0.16	0.17	0.19	71.8 (Toy-12)
Medium dense	HcToy-2, 4, 5	61.3	0.27	0.27	0.31	87.4 (Toy-5)

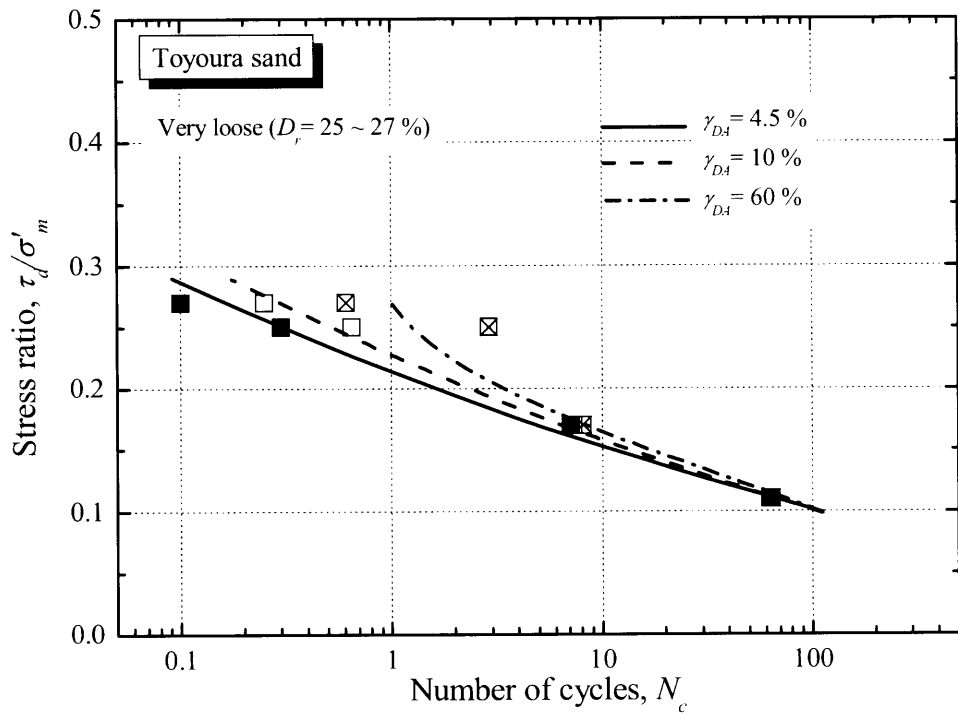


図6.4.11 非常に緩い供試体の液状化強度曲線

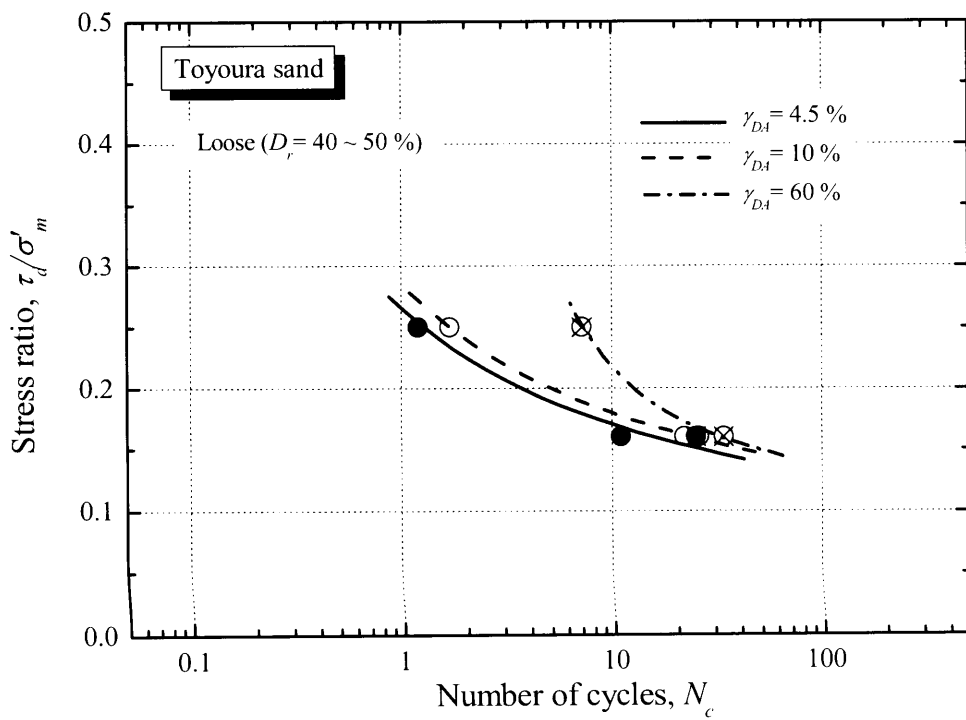


図6.4.12 緩い供試体の液状化強度曲線

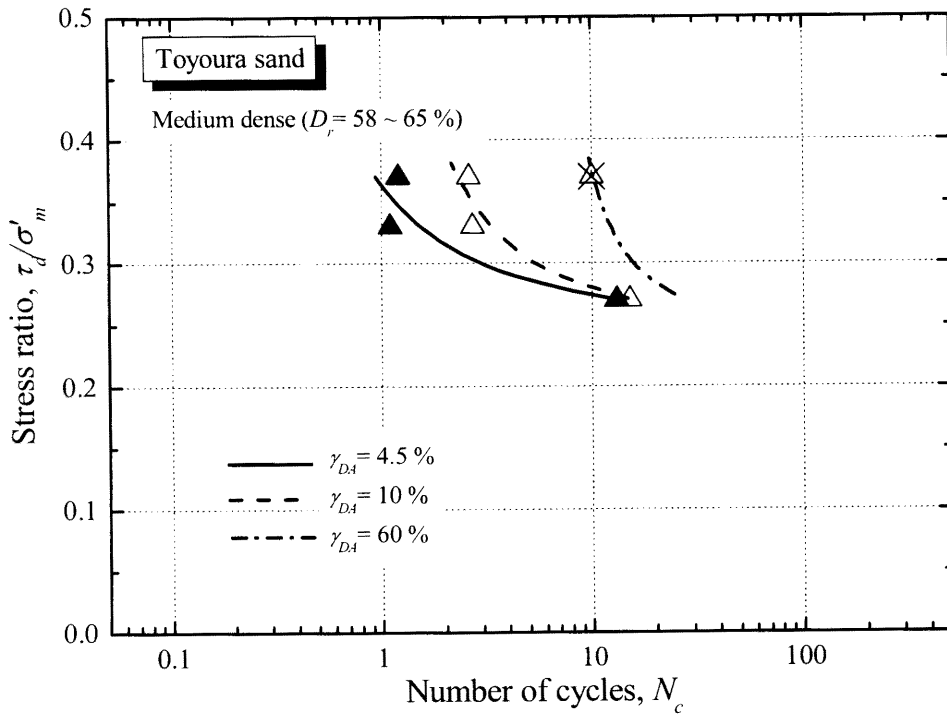


図6.4.13 中密供試体の液状化強度曲線

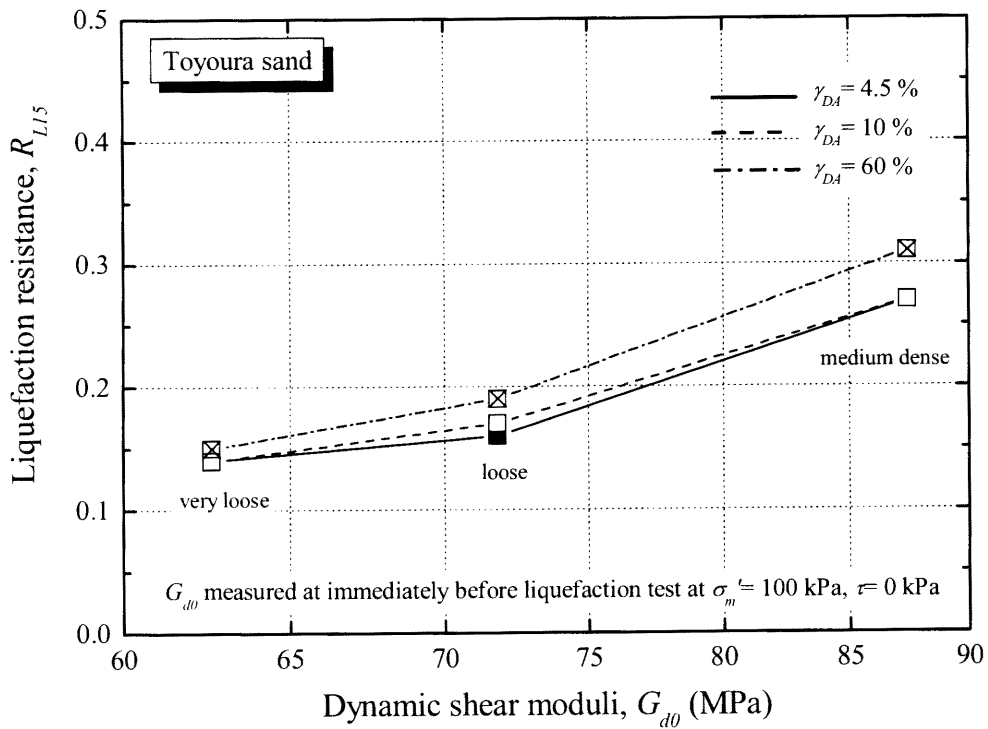


図6.4.14 豊浦砂の動的せん断剛性率と液状化強度の関係

6.4.3 液状化限界ひずみ γ_L^*

(1) 液状化限界ひずみ γ_L^* の定義

ここでは、大ひずみ液状化試験結果を基に、液状化した豊浦砂の繰返し载荷に伴うせん断ひずみ量の限界値（液状化限界ひずみ γ_L^* ）について考察する。

液状化試験より、比較的せん断応力比が低い場合でも、せん断ひずみ両振幅 γ_{DA} は100%に達している。一方、実際の地震による被災例（図6.2.8（時松,1997））によると、地盤の流動量は概ね液状化対象層の N 値に依存しており、ある程度 N 値が高ければ流動量はせん断ひずみ数～数十%以下の値に収束する。この原因として、実地盤では液状化した後、液状化免震により応答せん断応力が小さくなるのが理由のひとつとして考えられる。例えば、アレー観測結果の逆算結果より求められた実際に生じた液状化地盤の応力-ひずみ関係と有効応力経路（Elgamal et al., 1995）を図6.4.15に示すが、地震動の繰返し回数と共にせん断応力が低下している様子が確認できる。しかし、今回の大ひずみ液状化試験では、せん断応力一定条件で行われているため、 γ_{DA} は100%に達したものと考えられる。また、室内試験では、有効応力がほとんど失われ、*cyclic mobility*の状態になっても、繰返し回数とともにせん断ひずみは増加していく。したがって、非排水繰返し载荷による限界ひずみは試料が過去に経験した繰返し回数に依存するため、その定義が明確でない。

ここで、粒状体の一般的挙動について考える。最初に、Casagrande (1936)は鉛直拘束圧が一定の砂の一面せん断試験において、せん断に伴う砂の密度変化を観察した。その結果、せん断による最終的な砂の密度は、初期密度によらず一定の密度に収束することを見出し、これを限界間隙比とした。同様の実験結果は、Roscoe et al. (1958)によっても確認されている。Roscoe et al. (1958)は、直径1 mm の鉄球を試料として鉛直有効圧一定の単純せん断試験を行い、試料の間隙比は初期密度によらずせん断の最終段階においてひとつの限界間隙比に収束することを観察した（図6.4.16 a）。また、いろいろな間隙比と有効鉛直圧の組み合わせのもとで単純せん断を行い、限界間隙比と鉛直拘束圧の間には一意的な関係があることを確認し、間隙比-鉛直拘束圧平面状に限界間隙比線（図6.4.16 b）の*critical void ratio line*）を定義した。

これを受けて、Castro (1969)は、様々な密度の砂の非排水三軸圧縮試験を行い、せん断抵抗の減少が見られる非排水せん断挙動を収縮的挙動と呼び、せん断抵抗の増加が見られる挙動を膨張的挙動と呼んだ。また、非排水せん断によりせん断抵抗が最小となり、一定の密度と一定のせん断抵抗のもとで変形が進行する状態に対し、最小有効拘束圧とCasagrandeの限界間隙比との間に一意的な関係があることを示した。

限界間隙比と一定のせん断抵抗のもとで変形が進行する状態は、一般に定常状態と呼ばれる。定常状態理論についてまとめたものを図6.4.17に示す。せん断の最終状態である定常状態における有効応力状態は、間隙比と一対一の関係にあり、間隙比-有効応力平面において定常状態線を形成する。このような定常状態理論では、収縮的挙動を示す場合に一度定常状態に達する

と以後は同じ定常状態が保たれることを仮定している。しかし、実際の非排水試験においては、多くの場合において定常状態の後に再びせん断抵抗が増加する現象が認められる。このような一時的な定常状態を、Alarcon-Guzman et al. (1988)は準定常状態と名付けている。

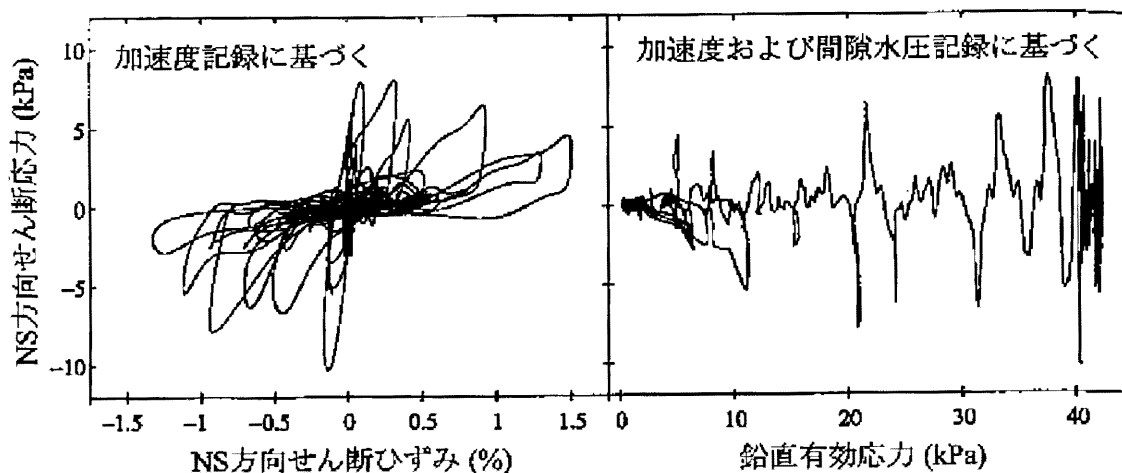


図6.4.15 アレー観測記録から逆算した液状化地盤における
応力-ひずみ関係と有効応力経路 (Elgamal et al., 1995)

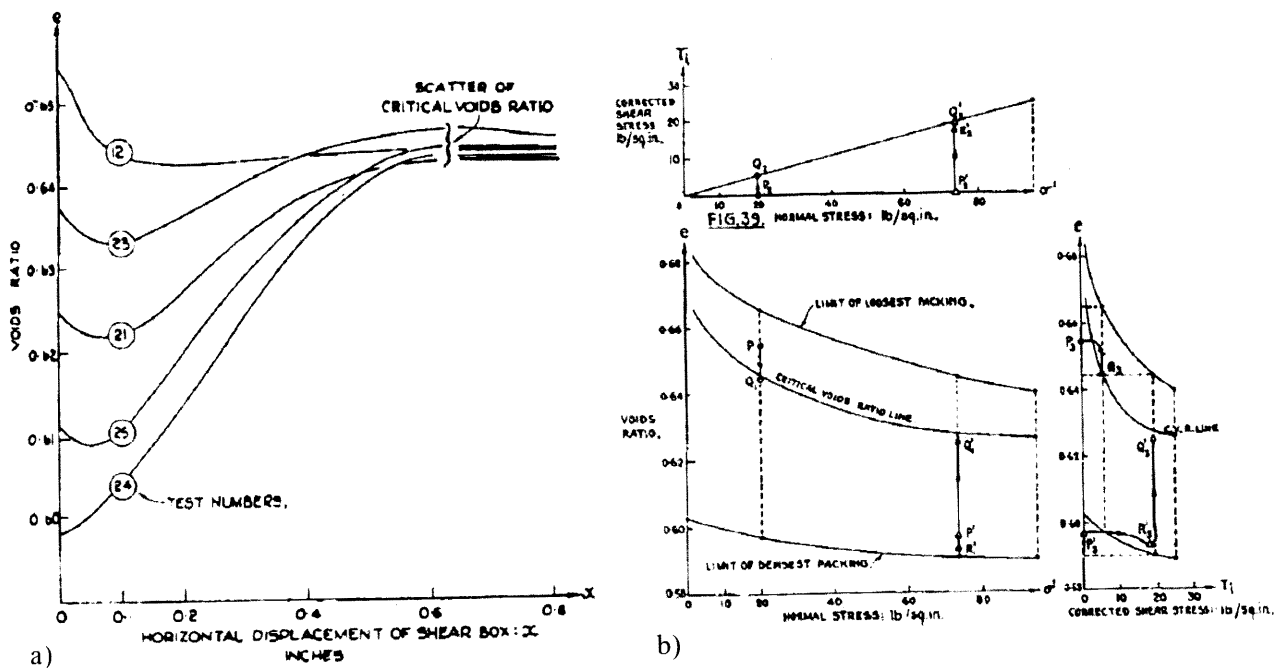


図6.4.16 a) 鉄球の排水単純せん断試験と b) 限界間隙比線 (Roscoe et al., 1958)

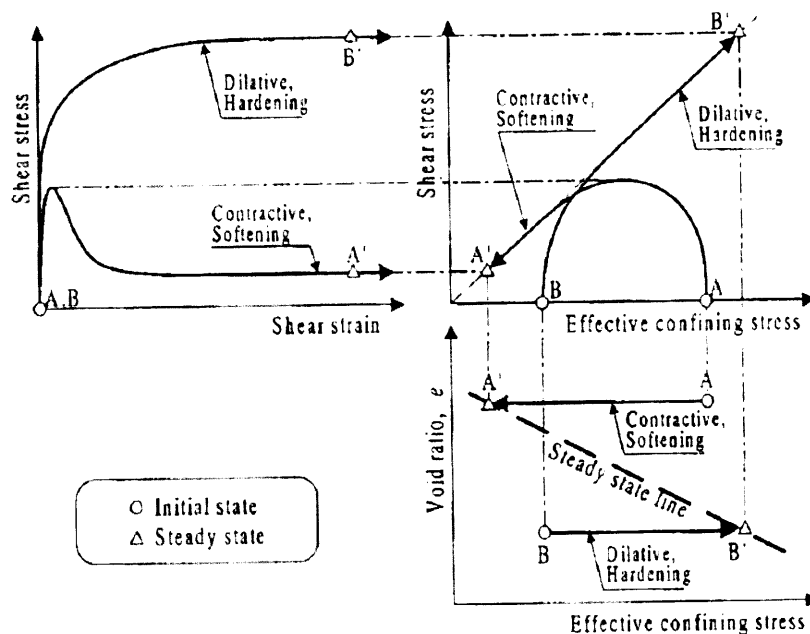


図6.4.17 定常状態理論における土の非排水せん断挙動（吉嶺, 1996）

次に、Verdugo (1992)は豊浦砂を用いて一連の非排水三軸試験を実施したが、一定の密度のもとでは拘束圧によらず、応力状態は一定の状態（極限定常状態）に収束することを示した。特に拘束圧の高い実験では、図6.4.18に示すように明確なせん断抵抗の低下と定常状態（準定常状態）の発現が認められたが、せん断ひずみが増大するにつれて、応力状態は極限定常状態に近づいている。図6.4.19は、Verdugo (1992)による非排水三軸圧縮試験で観察されたすべての変相状態（非排水単調せん断により平均有効主応力が最小となり間隙水圧の増加が減少に転じる状態）と極限定常状態を $e-\log p'$ 平面状にプロットしたものである。この図において、すべての極限定常状態は一つの極限定常状態線の上に位置している。このことは、非排水三軸圧縮試験において、土の密度が同じならば初期拘束圧の大きさによらず、極限定常状態における応力状態は同一となることを示している。

また、ある密度を持った砂がどの程度の液化化・流動化の傾向を持つのかを示す指標として、Been & Jefferies (1985)によるState parameter, ψ がある。 ψ は評価の対象となる砂の間隙比と、その初期有効拘束圧に対応する定常状態での間隙比の差であり、 ψ が大きいほど流動ポテンシャルは大きいと判断される。

しかし、本研究のような一定のせん断応力、非排水条件下においてせん断ひずみが増加する現象について、その限界値を定常状態や極限定常状態等の応力状態で説明することは難しい。これは、非排水繰返しせん断により土粒子構造が変化するため、限界状態は繰返し回数や応力

振幅の影響を受けるためである。しかし、非排水繰返し载荷による限界ひずみ量は、Been & Jefferies(1985)の流動ポテンシャルの概念と同様、試料の初期密度と相関があるものと考えられる。

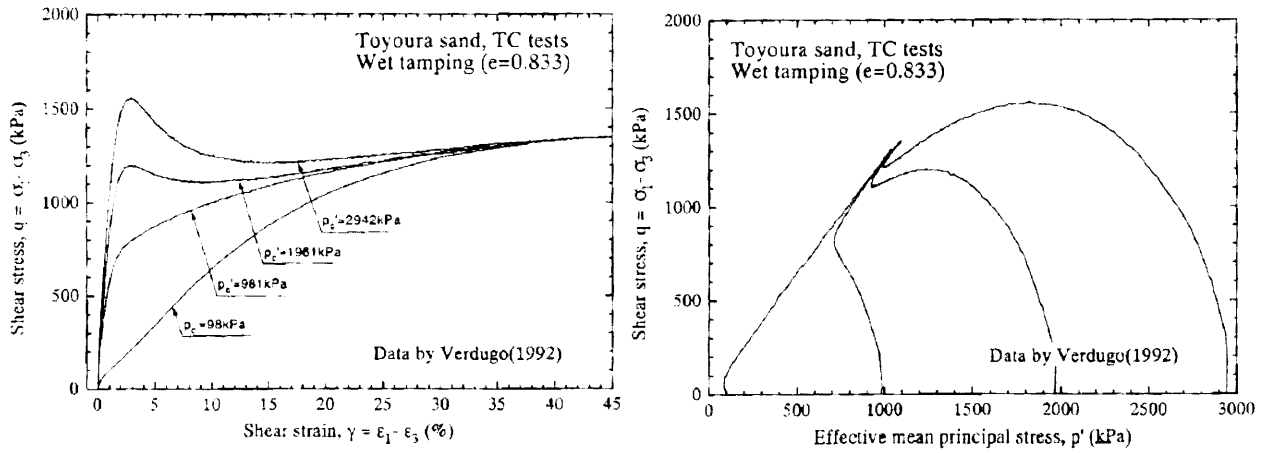


図6.4.18 砂の非排水せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響 (Verdugo, 1992)

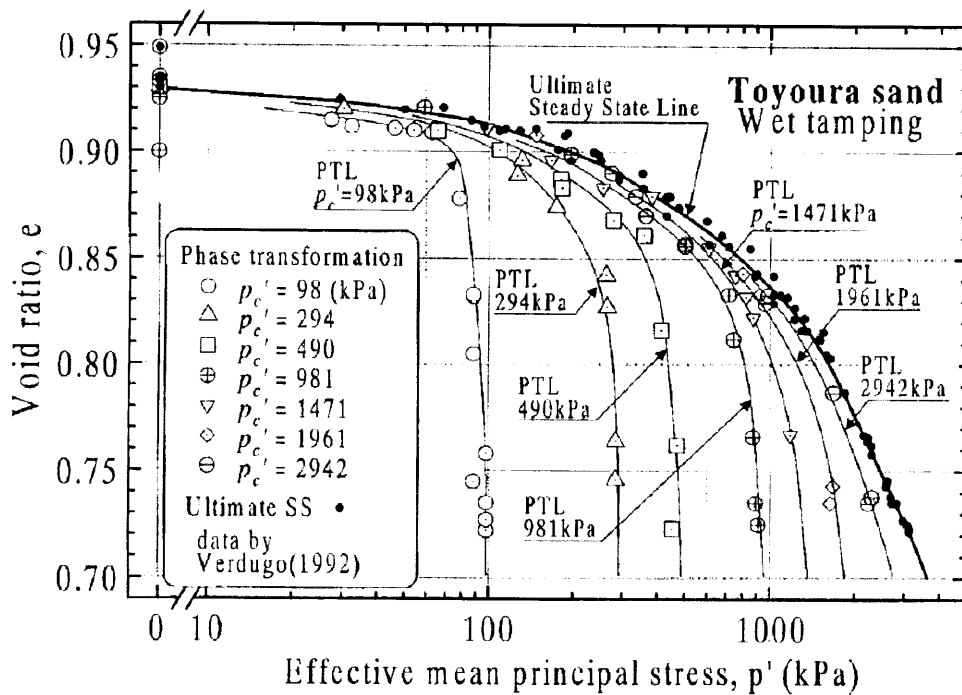


図6.4.19 豊浦砂の非排水三軸圧縮試験によって得られた変相線と極限定常状態線 (Verdugo, 1992)

ここで、本研究の緩い試料（HcToy-13）における液状化試験中の軸差応力 q の変化を図6.4.20に示す。本研究の中空ねじり試験機による液状化試験は、軸変位固定条件において実施しているため、液状化試験中の軸差応力は試料のダイレイタンスの影響を受ける。図6.4.20では、液状化初期段階において軸差応力は負となり、試料は収縮傾向を示すが、その後せん断ひずみが大きくなると（*cyclic mobility*によりせん断応力が増加する状態）、軸差応力は正となり、試料は膨張傾向を呈する。また、繰返し回数と共に軸差応力は増加するが、これはせん断に伴い正のダイレイタンス量が大きくなるからである。しかし、この状態で*cyclic mobility*が継続されると、ある時点（図中A点）において軸差応力のピークを迎え、その後軸差応力の急激な低下が認められる。同様の傾向は、非常に緩い試料、および中密試料でも確認できる。

この液状化試験中における軸差応力、すなわち膨張のピーク状態が、Casagrande (1936)、Roscoe et al. (1958)の定常状態に相当するか、Verdugo (1992)の極限定常状態に相当するかは判断できない。しかし、軸差応力の急激な低下は、*cyclic mobility*による供試体全体のダイレイタンス挙動に変化が生じたことを示している。

本研究によるこれまでの豊浦砂による液状化試験結果によると、*cyclic mobility*の初期段階では繰返し回数の増加とともにせん断ひずみは増加するが、次第にその増分は低下する。また、その後繰返し载荷を継続すると、せん断ひずみ増分は再度大きくなる。ここに、繰返し载荷中の軸差応力が低下する直前のせん断ひずみの点を図6.4.21 a)の応力-せん断ひずみ曲線上、b)のせん断ひずみと繰返し回数の関係上に矢印で示すが、この点はせん断ひずみ増分傾向の変化する境界に概ね対応している。また、有効応力経路でも、軸差応力が低下する点付近において変化が生じている。図6.4.22に軸差応力が低下する直前を含む応力経路を示すが、ダイレイタンスに伴うせん断応力増加の勾配が低下している。このような、せん断ひずみ増分傾向と有効応力経路の変化する境界前後の供試体観察より、せん断ひずみ増分が小さくなる過程までは供試体の変形は概ね同様であるが、増分が大きくなる過程では、供試体は完全に局所変形に至っている様子が認められ、要素試験の範疇を超えているものと考えられる（写真6.4.1~ 6.4.4参照）。したがって、図6.4.20に示した繰返しせん断過程における軸差応力の急激な低下は、試料の一部に変形の局所化が発達したことが原因と推定される。

本研究では、非排水条件下における一定振幅の繰返しせん断によるせん断ひずみの限界値（液状化限界ひずみ γ_L^* ）として、*cyclic mobility*によりせん断応力が増加したときの軸差応力 q が低下する直前のせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ を用いることとする（図6.4.23）。繰返し载荷によるひずみ量は直前の繰返し载荷によるひずみ量に依存すると考えると、この定義による液状化限界ひずみ γ_L^* は、繰返し载荷により局所的な変形を引き起こすせん断ひずみと位置づけられる。別な言葉では、 γ_L^* は任意の地震応力振幅において振動中に地盤が一様に変形する領域で生じ得る最大せん断ひずみといえよう。しかし、この γ_L^* が実際の液状化地盤の残留変位を表しているかどうかについては検討の余地がある。

次に、液状化限界ひずみについて、修正応力比 $(\tau-\Delta\tau)/(p'+\Delta p')$ とせん断ひずみの関係から考察する。ここで、修正応力比を用いた理由は、平均有効応力 p' が非常に小さくなった場合(≈ 0)、通常の応力比 τ/p' で整理すると応力経路が非常に不安定になるためである。代表的な試験の有効応力経路における原点付近の様子を図6.4.24に示すが、有効応力経路はほぼ原点を通過するものの、 $p' = 1.0$ kPa付近において明瞭な屈曲点が認められる。この原因としては、 $p' = 1.0$ kPa付近において、土粒子同士の相互関係(例えば*inter-locking*)に変化が生じている可能性や、単なる機械的な計測誤差、およびメンブレン張力補正に不具合がある可能性等が考えられる。今回と同様の試験結果に対し、Koseki et al. (2005) は図6.4.24に示すように、有効応力経路を左側に延長させた仮の原点について、 τ と p' それぞれの軸からの距離 $\Delta\tau$ と $\Delta p'$ を用いた修正応力比 $(\tau-\Delta\tau)/(p'+\Delta p')$ を用いることにより、せん断ひずみとの関係を適切に表せると報告している。

図6.4.24より求められた $\Delta\tau$ と $\Delta p'$ を用いた修正応力比 $(\tau-\Delta\tau)/(p'+\Delta p')$ とせん断ひずみの関係を図6.4.25に示す。繰返し回数が増すと、応力ひずみ関係に乱れが生じるが、前述の液状化限界ひずみに至るまでは、比較的安定したループが描かれている。図中には、図6.4.23で定義した液状化限界ひずみ γ_L^* についても併記しているが、応力ひずみ関係は γ_L^* とほぼ同じせん断ひずみ両振幅に達する付近で、明確な軟化状態を示している(赤矢印)。この原因としては、既に述べたように供試体の変形の一様性が失われ、局所化が生じたためと考えられる。以降の検討においては、液状化限界ひずみ γ_L^* の定義として図6.4.23に示した手法を用いるが、修正応力比とせん断ひずみの関係からも γ_L^* を求められると言えよう。

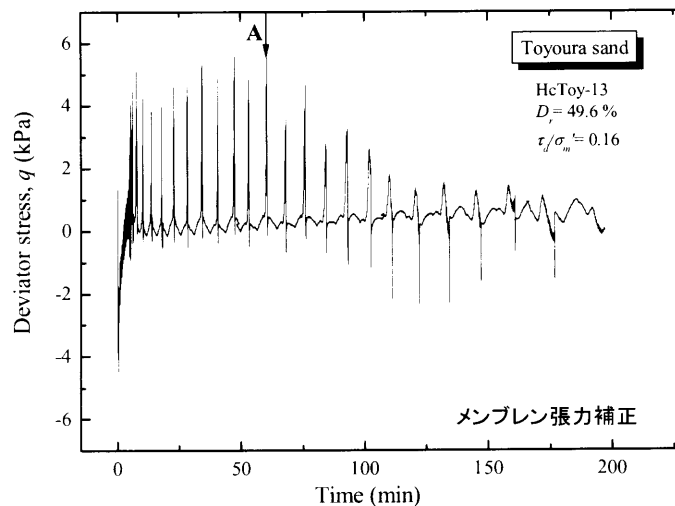


図6.4.20 液状化試験中の軸差応力の変化

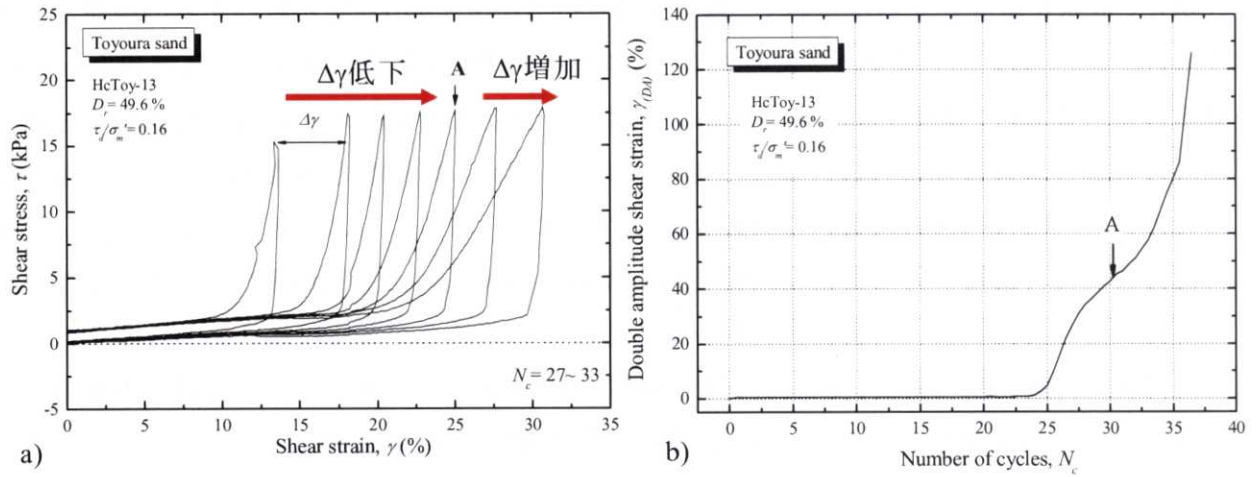


図6.4.21 液状化試験中に軸力が低下した時の
a)応力-せん断ひずみ曲線と b)せん断ひずみ-繰返し回数の関係

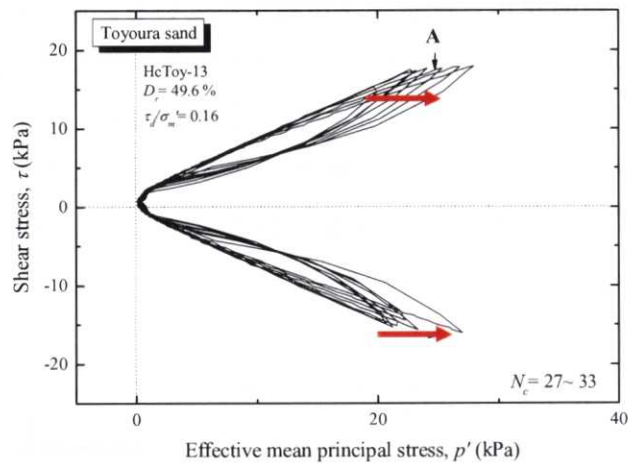


図6.4.22 液状化試験中に軸力が低下した時の有効応力経路の変化

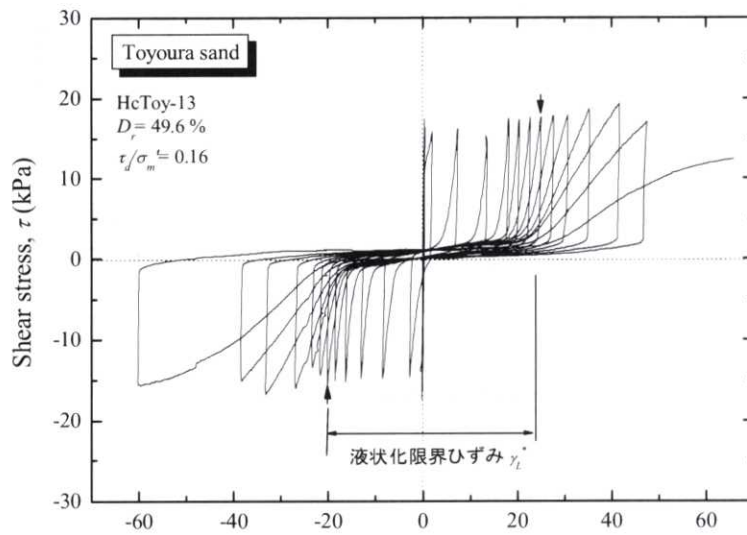


図6.4.23 本研究における液状化限界ひずみ γ_L^* の定義

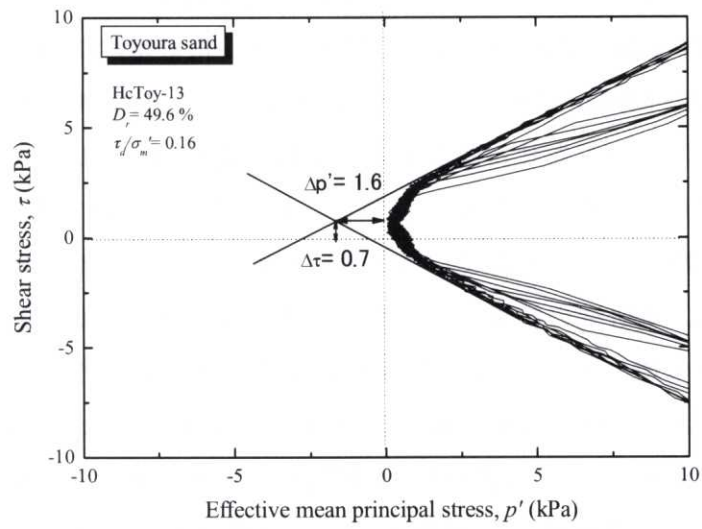


図6.4.24 有効応力経路の原点付近拡大図

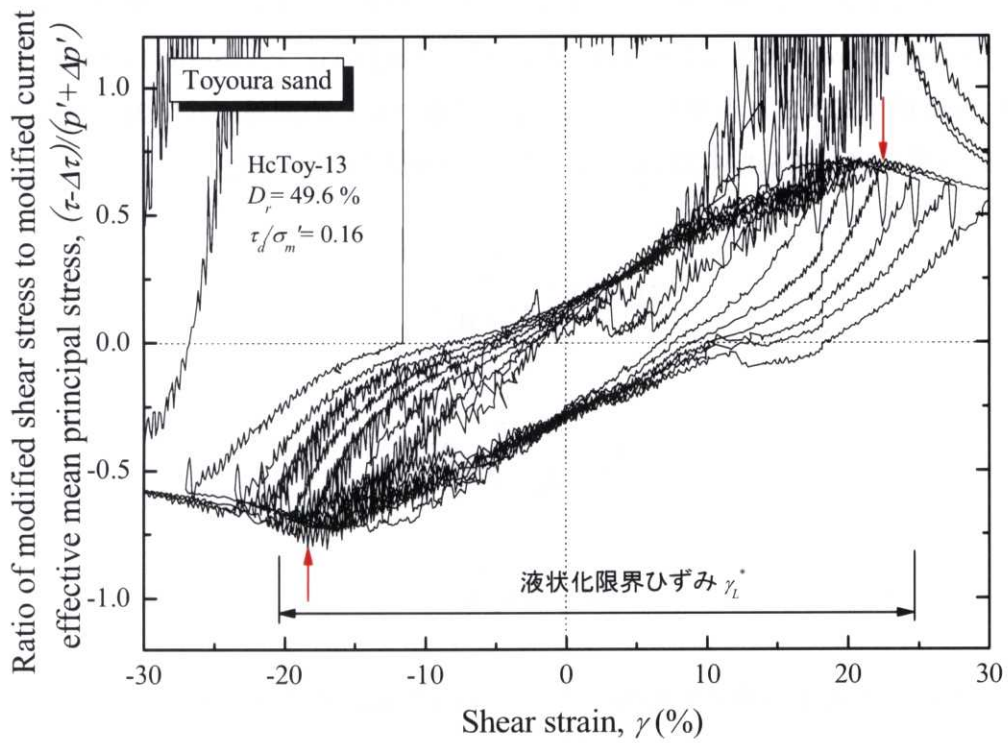


図6.4.25 修正応力比とせん断ひずみの関係

(2) 豊浦砂の液状化限界ひずみ γ_L^*

本研究において実施した豊浦砂の大ひずみ液状化試験結果として、(1)において定義した液状化限界ひずみ γ_L^* を図6.4.26、表6.4.5に示す。結果より、相対密度 D_r の低下と共に γ_L^* は大きくなり、全体的に一意的な傾向が認められる。(1)において示した定義に従う場合、密な試料では *cyclic mobility* の状態になってもせん断ひずみの増分は比較的小さいため、せん断応力比に依存しない γ_L^* が比較的精度良く求められる。しかし、非常に緩い試料の場合、*cyclic mobility* の状態になると急激にせん断ひずみが大きくなるため、求められる γ_L^* はせん断応力比により変化する可能性が考えられる。本研究の結果では、相対密度 D_r が30%以下の試料では、*cyclic mobility* 状態でのせん断ひずみの増分 $\Delta\gamma$ (図6.4.21参照) の変化が比較的大きかったため、液状化によって生じる最大ひずみとしては、図6.4.26に示した値よりも大きくなる可能性がある。

また、これまでの実験により、初期微小変形特性は液状化強度との相関がよいことを示してきたが、図6.4.27に示す初期動的せん断剛性率 G_{d0} と液状化限界ひずみ γ_L^* の関係より、両者の間には一意的な関係が認められた。

次に、本研究による液状化限界ひずみ γ_L^* と、液状化後の残留変形について検討した時松(1997)の報告とを比較する。時松(1997)の報告では、液状化後の残留変形について補正 N 値(実測 N 値を有効拘束圧 $\sigma'_0 = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 100 \text{ kPa}$ の値に正規化した N 値)との相関を得ていることから、ここではMeyerhof(1957)による N 値と D_r の関係(式[6.1])と、Seed(1979)による N 値と補正 N 値(N_1)の関係(式[6.2])を用いて、 D_r と補正 N 値(N_1)の関係(式[6.3])を得た。下式による N_1 と γ_L^* との関係は、表6.4.4に併記すると共に、図6.2.28に示した。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_0 + 0.7}} \quad [6.1]$$

$$N_1 = \frac{1.7}{\sigma'_0 + 0.7} N \quad [6.2]$$

$$D_r = 16 \sqrt{N_1} \quad [6.3]$$

本研究における豊浦砂の液状化限界ひずみ γ_L^* の片振幅に相当する値($\gamma_L^*/2$)を、時松(1997)の示した補正 N 値と限界残留ひずみの関係に併記したものを図6.4.29に示す。時松(1997)による補正 N 値と限界残留ひずみの関係は、実際の地震で被災した箇所を航空写真や現地計測で得られた護岸近傍地盤の限界残留ひずみと対応していることを6.2.4にて述べたが、本研究における液状化限界ひずみ γ_L^* とも D_r が比較的大きい試料については良く対応していることが確認できた。しかし、比較的低い N 値の領域($N_1 < 5$)では、本研究による実験値の方が小さな値を示す。

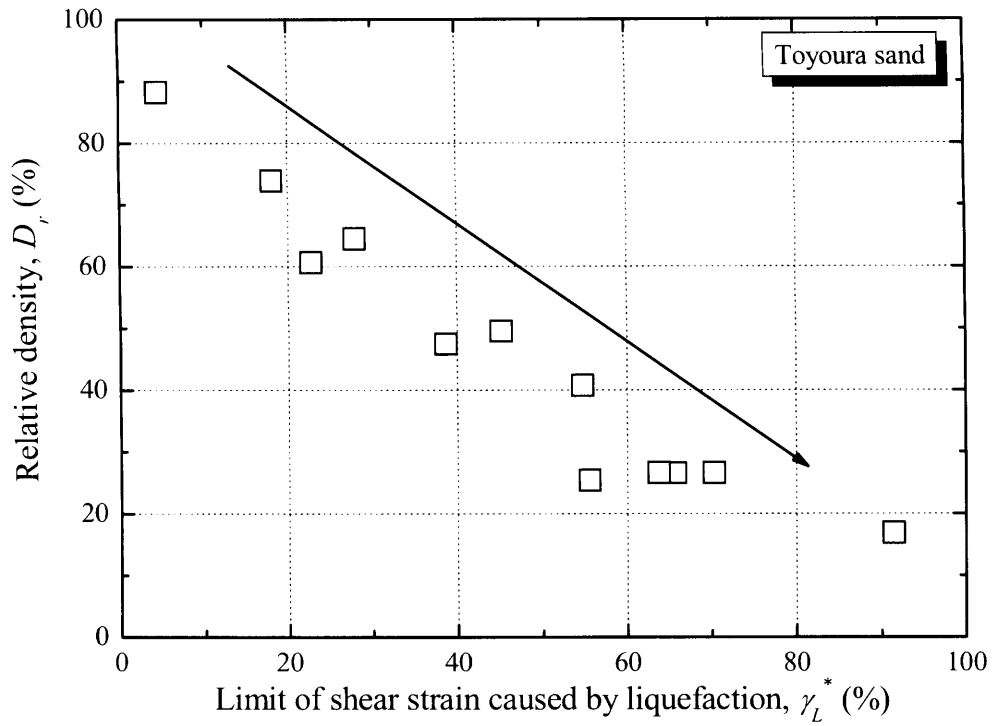


図6.4.26 豊浦砂の相対密度と液状化限界ひずみの関係

表 6.4.4 豊浦砂の相対密度と液状化限界ひずみの関係一覧

No.	D_r (%)	補正 N 値 N_l	応力比振幅 τ_d/σ'_m	液状化限界 ひずみ γ_L^* (%)
HcToy-1	88.3	30.5	0.4	4.5
HcToy-4	60.7	14.4	0.37	22.8
HcToy-5	64.5	16.3	0.27	27.9
HcToy-6	26.6	2.8	0.27	65.7
HcToy-7	25.4	2.5	0.17	55.6
HcToy-8	26.6	2.8	0.11	70.3
HcToy-10	40.7	6.5	0.16	54.8
HcToy-11	26.7	2.8	0.35	63.8
HcToy-12	47.7	8.9	0.25	38.6
HcToy-13	49.6	9.6	0.16	45.2
HcToy-16	73.9	21.3	0.4	18.1
HcToy-17	16.8	1.1	0.43	91.5

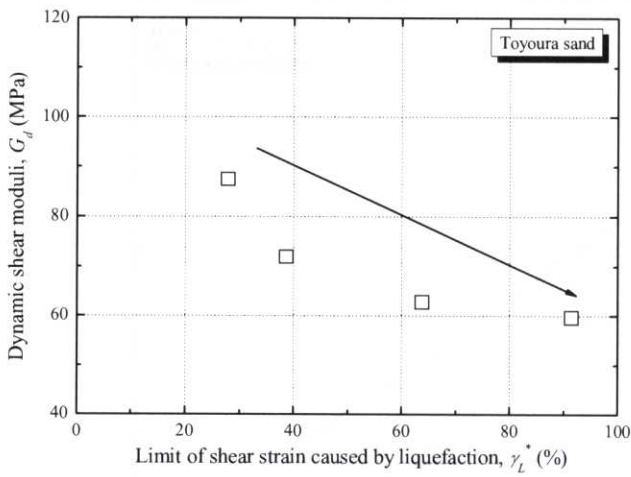


図6.4.27 豊浦砂の動的せん断剛性率と液状化限界ひずみの関係

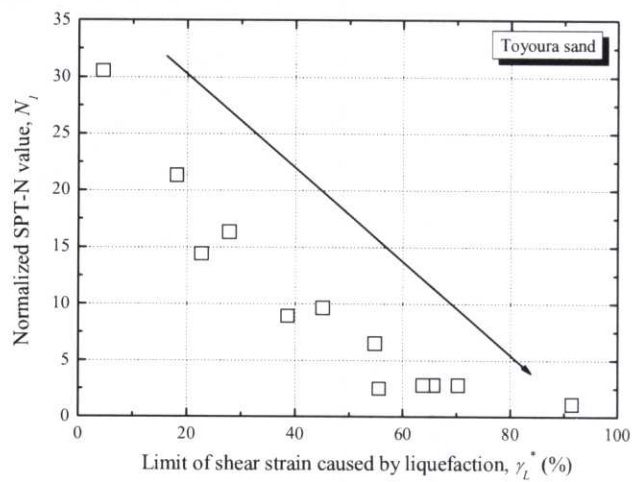


図6.4.28 豊浦砂の補正N値と液状化限界ひずみの関係

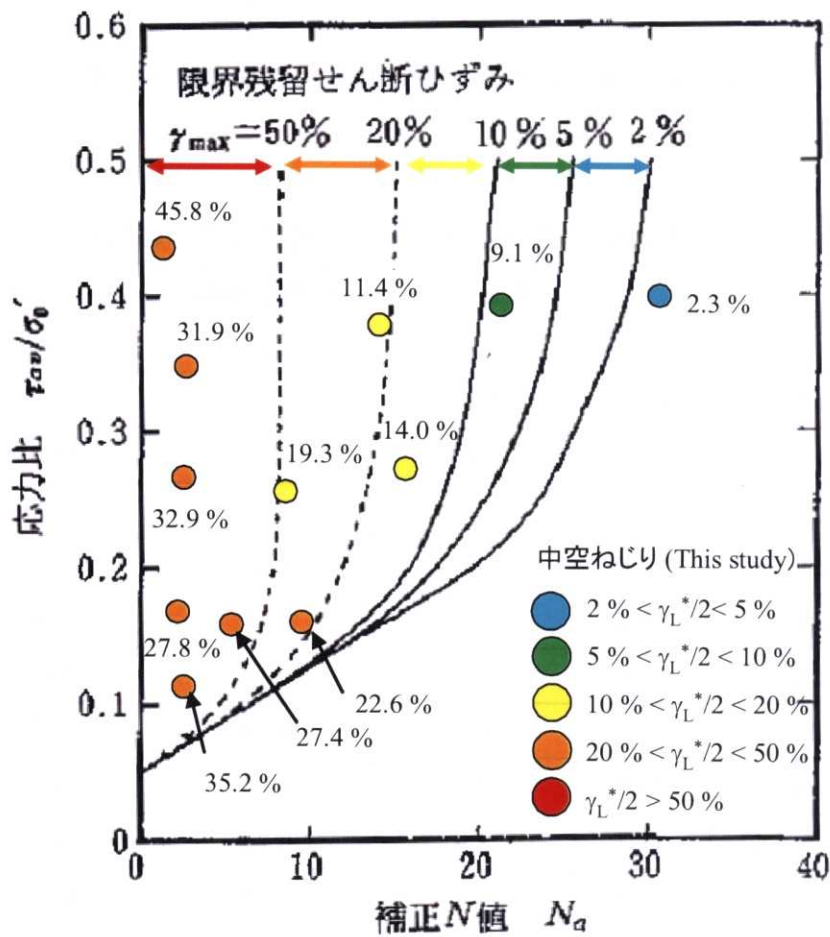


図6.4.29 大変形液状化試験による液状化限界ひずみ（片振幅）と時松（1997）による限界残留せん断ひずみとの比較

実験より得られた豊浦砂の液状化限界ひずみ γ_L^* は、相対密度 D_r および初期動的せん断剛性率 G_{d0} とは対応していたが、図6.4.30に示すように、実験時のせん断応力比とは対応していない。図6.4.30では、豊浦砂による実験結果を大まかに密度区分して示している。非常に緩い試料($D_r < 30\%$)以外では、せん断応力比を幅広く変えて実施した実験は少ないが、全体的に同程度の密度であれば、せん断応力比によらず γ_L^* は概ね一定の範囲に分布すると考えられる。また、 γ_L^* と、 γ_L^* に至るまでに要した繰返し回数の関係を図6.4.31に示すが、この図からも液状化限界ひずみ γ_L^* はせん断応力比によらず、密度ごとに一定の範囲に分布すると考えられる。

以上を踏まえ、図6.4.32に、応力比振幅と液状化限界ひずみに至るまでの繰返し回数との関係を示した。液状化限界ひずみは各密度の試料で一定値となるが、せん断応力比の低下により繰返し回数が増加するため、従来の液状化強度曲線と似た関係が得られている。この図より、例えば通常地震による繰返し回数を15回と規定した場合、非常に緩い砂($D_r < 30\%$)ではせん断応力比が $\tau_d/\sigma'_m = 0.14$ 程度、中密な砂($55\% < D_r < 65\%$)では $\tau_d/\sigma'_m = 0.29$ 程度で液状化限界ひずみ γ_L^* に至ると考えられる。また、同図に従来の $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ ($\varepsilon_{v(DA)} = 3\%$)で規定した液状化強度曲線を追記したものを図6.4.33に示す。これにより、非常に緩い砂($D_r < 30\%$)では、 $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ と γ_L^* の曲線との差が小さいため、液状化発生から γ_L^* に達するまでの余裕はほとんどないといえる。一方、中密な砂($55\% < D_r < 65\%$)では両者の差は比較的大きく、地震によるせん断応力や継続時間によっては γ_L^* に至らないと考えられる。

既に定義したように、液状化限界ひずみは供試体が一定せん断応力振幅において一様に変形できる最大のせん断ひずみである。したがって、実際の地震動が想定外の大きさであったり、繰返し回数が増加したりしたとしても、地盤が局所的な破壊をしない限り γ_L^* は一定値を超えることはないといえる。また、密な砂の場合は γ_L^* の値は小さくなり、 $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ で規定した液状化曲線とほとんど差の無い γ_L^* の曲線が得られる場合があるが、このケースについては γ_L^* の値は小さいため、液状化の程度が大きいと判断すべきではない。

なお、本研究では、有効拘束圧を変化させた実験を実施しておらず、液状化限界ひずみ γ_L^* に及ぼす拘束圧の影響を考慮していない。Yasuda, et al. (1995) は、液状化後の単調載荷試験により、液状化後のせん断ひずみ量は初期有効拘束圧により変化することを報告している(図6.4.34)。また、Kokusho (2000) は、液状化による側方流動のメカニズムは、地盤の不均一性によるところが大きく、砂層中にシーム状に介在するシルト層が地震時に水膜を形成することで上位層が大変形に至ることを実験と解析により示している。このような液状化限界ひずみ γ_L^* に及ぼす様々な影響については今後の検討課題とする。

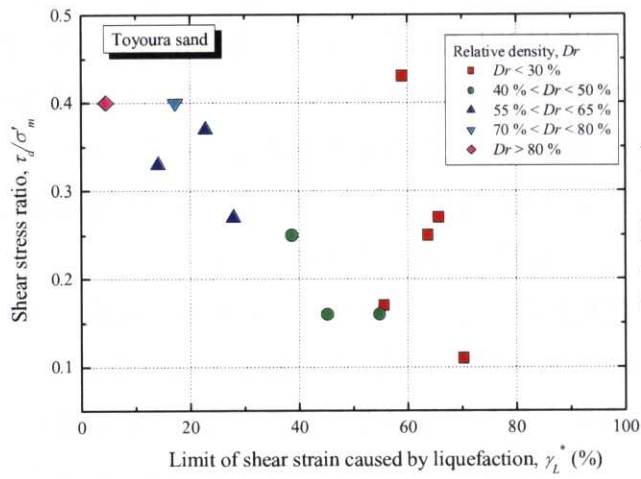


図6.4.30 繰返しせん断応力比と液状化限界ひずみの関係

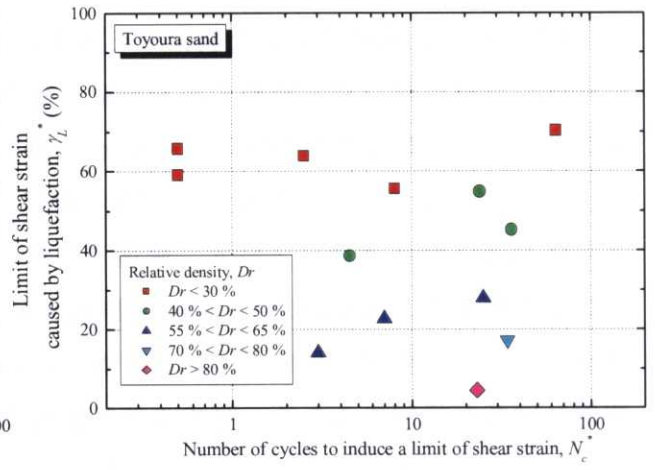


図6.4.31 液状化限界ひずみと繰返し回数の関係

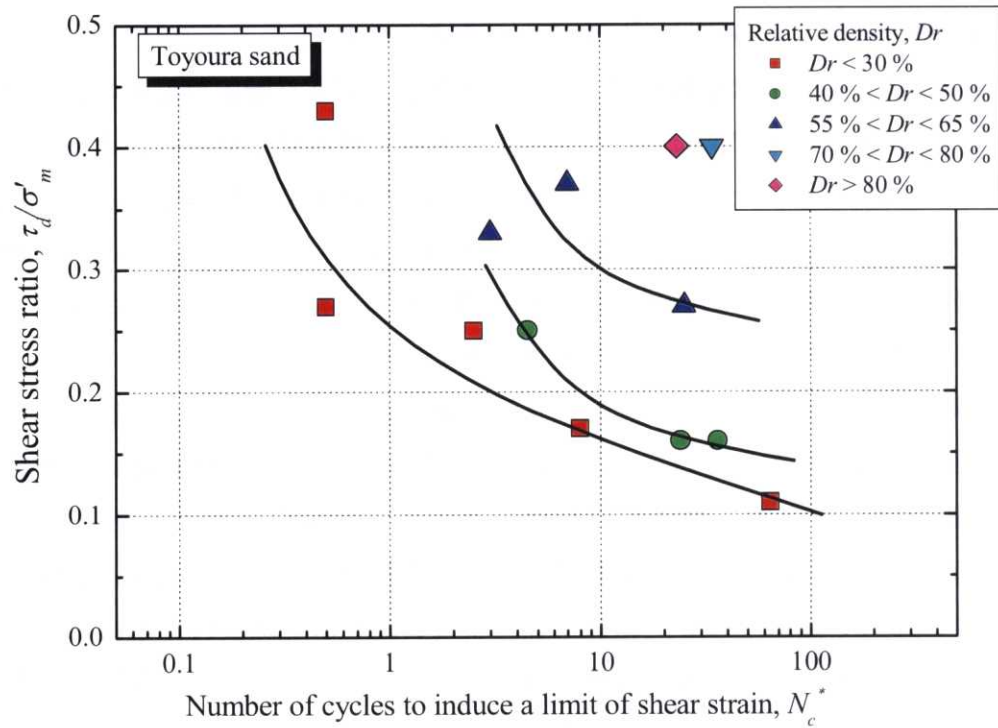


図6.4.32 繰返しせん断応力比と液状化限界ひずみに至る繰返し回数の関係

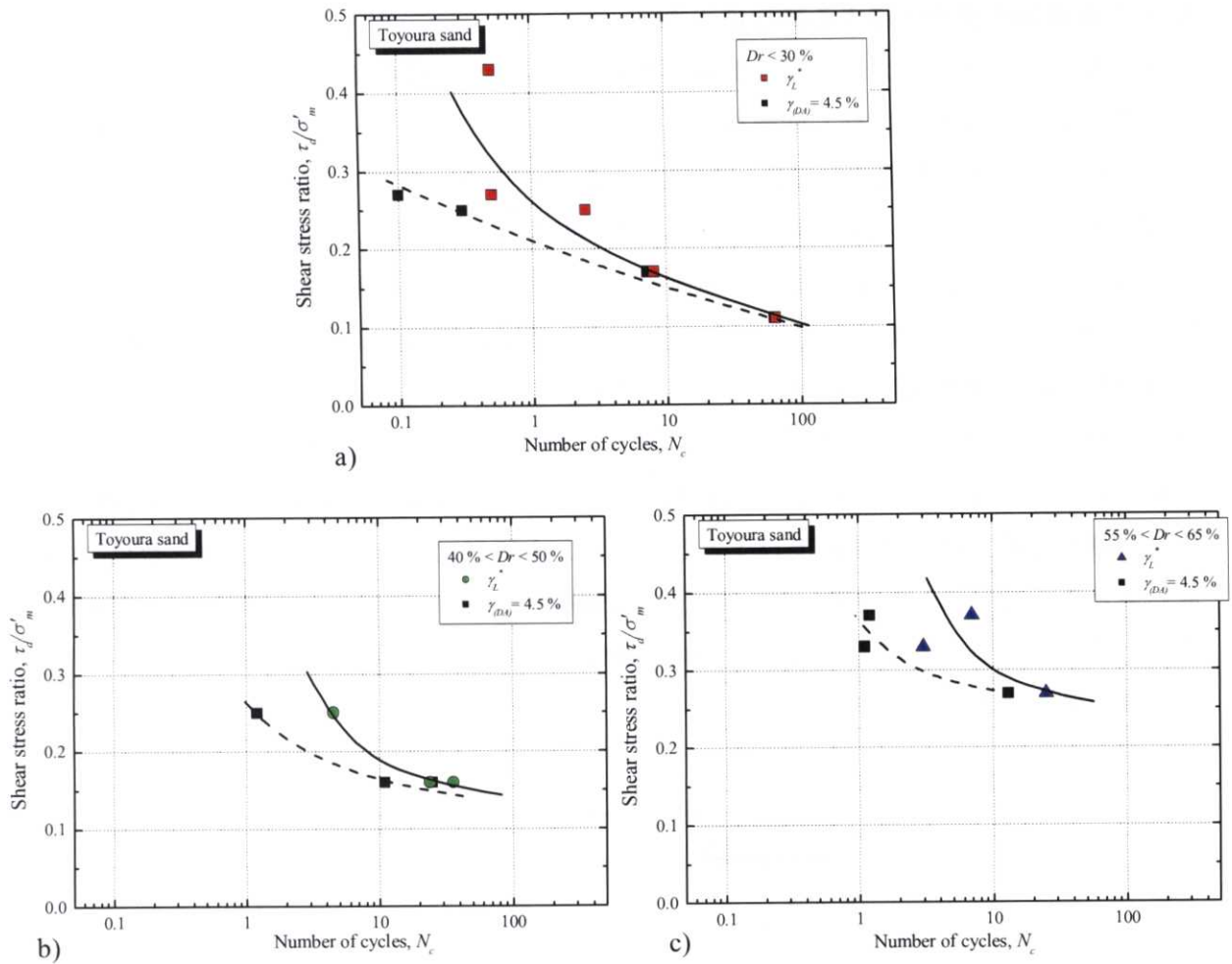


図6.4.33 従来の液状化強度曲線 ($\gamma_{DA} = 4.5\%$) と液状化限界ひずみの関係
 a) 非常に緩い試料, b) 緩い試料, c) 中密な試料

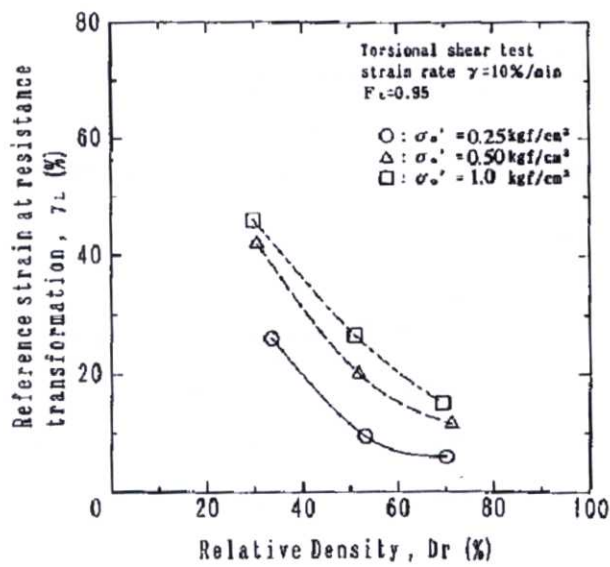


図6.4.34 豊浦砂の密度と液状化後の最大ひずみの関係 (Yasuda, et al., 1995)