

6.4.4 豊浦砂の液状化による剛性低下率

液状化中における応力-ひずみ関係において、原点から剛性回復が始まる点までの勾配より、液状化によって低下したせん断剛性率 G_l を求めることができる (Yasuda, et al., 1995)。本研究では、各試料の液状化限界ひずみ γ_L^* に達したときの応力-ひずみ関係を用いて液状化後のせん断剛性率 G_l (各ねじり方向の平均値) を求め、液状化前に計測した動的せん断剛性率 G_{d0} と比較することにより、液状化によるせん断剛性率の低下率 G_l/G_{d0} を求めた。

図6.4.33に、 γ_L^* が発生したときの応力-ひずみ関係の代表例を示す。また、表6.4.5に豊浦砂の液状化による剛性低下率 G_l/G_{d0} を示す。結果より、液状化によるせん断剛性率の低下率は試料の密度と良く対応しているといえる。非常に緩い試料では、液状化により1/15,000程度にまで低下する。一方、中密試料では1/6,000程度であった。Yasuda, et al. (1995)は、豊浦砂の液状化による剛性の低下は1/1,000程度以下としており、本研究による値はこれよりも数倍~10倍程度低い値となっている。この違いは、液状化後の剛性 G_l よりも液状化前の剛性 G_{d0} の影響が大きいものと考えられる。本研究では液状化前の剛性として動的計測結果を用いたため、液状化による剛性の低下は非常に大きく見積もられた。

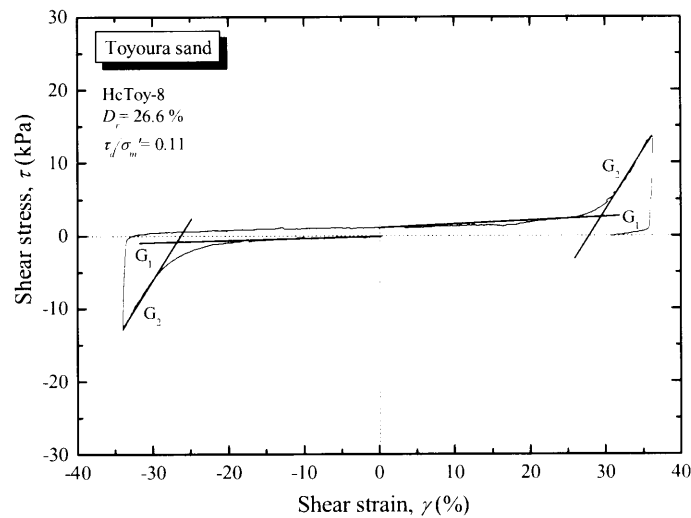


図6.4.33 液状化限界ひずみ時のせん断剛性率の概要

表 6.4.5 豊浦砂の液状化による剛性低下率

No.	D_r (%)	G_l (kPa)	G_2 (kPa)	G_{d0} (MPa)	G_l/G_{d0}
HcToy-5	64.5	13.8	947.7	87.4	1.6×10^{-4}
HcToy-8	26.6	4.0	165.8	62.6	6.4×10^{-5}
HcToy-12	47.7	10.2	789.9	71.8	1.4×10^{-4}

6.5 原位置採取試料による大ひずみ液状化試験

第5章の三軸液状化試験で用いた試料と同じ地層から採取された凍結試料と、その再構成試料において一連の大ひずみ液状化試験を実施した。

第4章、第5章より、融解時拘束圧 $\sigma_{c(thaw)}$ が凍結試料の微小変形特性や液状化強度特性に影響を与える可能性があるため、ここで用いた凍結試料は原則として原位置有効上載圧と同じ拘束圧で融解された。一方、江戸川砂C試料の原位置有効上載圧は約160 kPaであったが、洪積層では $\sigma_{c(thaw)}$ の影響は比較的小さいことから、 $\sigma_{c(thaw)}$ は98 kPa（負圧による拘束圧の限界値）にて実施した。

各試料は、三軸試験時と同じ拘束圧まで等方圧密後、所定のせん断応力比を非排水条件で与えられた。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（ $\dot{\gamma} = 5.5 \text{ \%}/\text{min}$ ）条件下で行われた。

6.5.1 凍結採取試料の大ひずみ液状化試験

本研究では、凍結採取試料の中空ねじり試験は、江戸川砂A, B, C試料を用いて実施した。このうち、江戸川砂A試料は沖積層、江戸川砂B, C試料は洪積層より採取されたものである。図6.5.1、写真6.5.1に江戸川砂A試料（HcEdo-A-F1）、図6.5.2、写真6.5.2、および図6.5.3、写真6.5.3に江戸川砂B試料（それぞれHcEdo-B-F1, F2）、図6.5.4、写真6.5.4、および図6.5.5、写真6.5.5に江戸川砂C試料（それぞれHcEdo-C-F1, F2）の有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。各写真は、各図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様子である。

第5章に示したように、江戸川砂A試料と同一層から採取された試料により三軸試験も実施されたが、三軸試験では繰返し載荷に伴う有効応力の低下は約10 kPa程度で止まっていた。一方、中空試験では有効応力は原点付近まで低下している。これは第2章（表2.2.4）に示したように、三軸試験で用いられた江戸川砂A試料の細粒分含有率は62 %程度であったのに対し、中空試料では34 %程度であったことが考えられる。また、江戸川砂C試料についても、中空試料の細粒分含有率は9 %程度であり、三軸試料では3 %程度であった。江戸川砂B試料の三軸試験試料は、中空供試体整形時の削り貫いたコアを用いているため、粒度分布は同じである（2.2.2参照）。

各凍結試料による中空試験結果より、繰返し回数とともに有効応力は低下して*cyclic mobility*の状態となり、いずれの試料も有効応力は原点に近い値まで低下する。しかし、豊浦砂による実験と比較して、有効応力がゼロの状態で行うせん断ひずみは比較的小さい。この傾向は、細粒分の比較的多い江戸川砂A, C試料において認められる。

全体的に、試験開始から比較的小さなひずみレベルまでは供試体は概ね一様に変形しているが、せん断ひずみが大きくなるにつれて、ダイレイタンスーによるせん断応力増加後の除荷時

にしわが発生する。いずれの方向にせん断してもしわが発生するため、供試体にはしわによる×印が多く認められる。さらにせん断ひずみが大きくなると供試体の一部、または全体にせん断層が不規則に発現し、変形の局所化が生じている。このような傾向が特に顕著な例としては、図6.5.2, 写真6.5.2に示す江戸川砂B試料 (HcEdo-B-F1) と図6.5.4, 写真6.5.4の江戸川砂C試料 (HcEdo-C-F1) であり、せん断層に沿って変形が局所化するため、大変形に至ると供試体は完全に歪む。また、大ひずみレベルにおいては、供試体に生じる局所変形よりも大きな変形が供試体上端部のキャップとの境に生じる。特に図6.5.3, 写真6.5.3に示す江戸川砂B試料 (HcEdo-B-F2) と図6.5.5, 写真6.5.5の江戸川砂C試料 (HcEdo-C-F2) では、供試体変形に対し、上端部の変形は著しい。一方、図6.5.1, 写真6.5.1の江戸川砂A試料 (HcEdo-F-A1) では、他の試料よりも細かいしわの発生が供試体全体に認められた。

表6.5.1に各凍結試料の所定のせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ に達するまでに必要な繰返し回数 N_c を示す。全体的に試料の密度が高いため、中密豊浦砂の実験と同様、繰返し回数と共に徐々にせん断ひずみも大きくなる傾向が認められ、緩い豊浦砂のような急激なひずみの増加は認められない。しかし、江戸川砂C試料では、B試料よりも繰返しに伴うひずみの増分は若干大きくなる傾向が認められる。また、江戸川砂B試料については、せん断応力比 $\tau_d/\sigma'_m = 0.45$ のHcEdo-B-F2よりも、 $\tau_d/\sigma'_m = 0.40$ のHcEdo-B-F1の方が、繰返し回数に伴うひずみの増加傾向が大きかった。比較的ひずみの増分が小さかったHcEdo-B-F2試料については、試験後の試料の観察により直径3 cm程度の硬質（指で強く押してへこむ程度）な粘土塊の混入が確認された。この粘土塊の混入により液状化に対する抵抗が増加した可能性が考えられるが、明確な理由は得られていない。

なお、凍結試料による最終的なせん断ひずみは、豊浦砂と同様、せん断応力比によらず $\gamma_{(DA)}$ は100%に達している。HcEdo-A-F1とHcEdo-B-F1では途中で実験が終了しているが、これはケーブル脱落のためである。

表 6.5.1 凍結試料の液状化試験結果

No.	D_r (%)	F_c (%)	τ_d/σ'_m	繰返し回数 N_c				
				$\gamma_{(DA)} = 4.5\%$	$\gamma_{(DA)} = 10\%$	$\gamma_{(DA)} = 30\%$	$\gamma_{(DA)} = 60\%$	$\gamma_{(DA)} = 100\%$
HcEdo-A-F1	-	34.3	0.40	12	19	28	-	-
HcEdo-B-F1	70.0	3.0	0.40	9.1	22	33	38	-
HcEdo-B-F2	74.5	3.0	0.45	28	37	48	57	60
HcEdo-C-F1	81.3	9.4	0.43	1.5	3.1	5.1	6.2	7.1
HcEdo-C-F2	100.5	9.4	0.30	35	44	52	57	59

- : ケーブル脱落

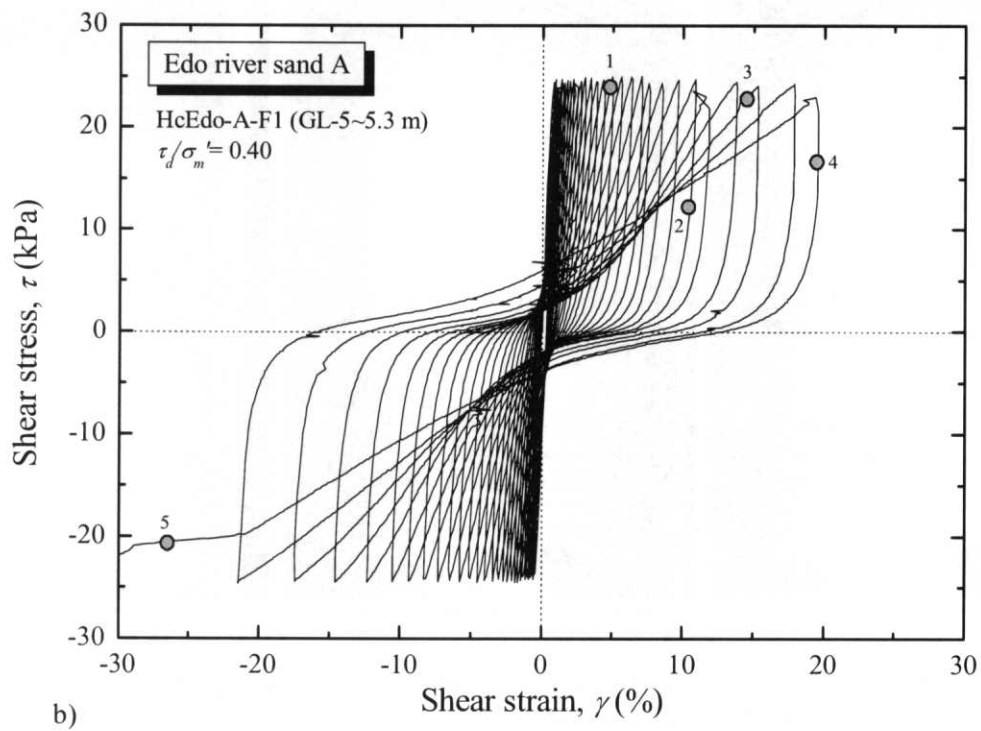
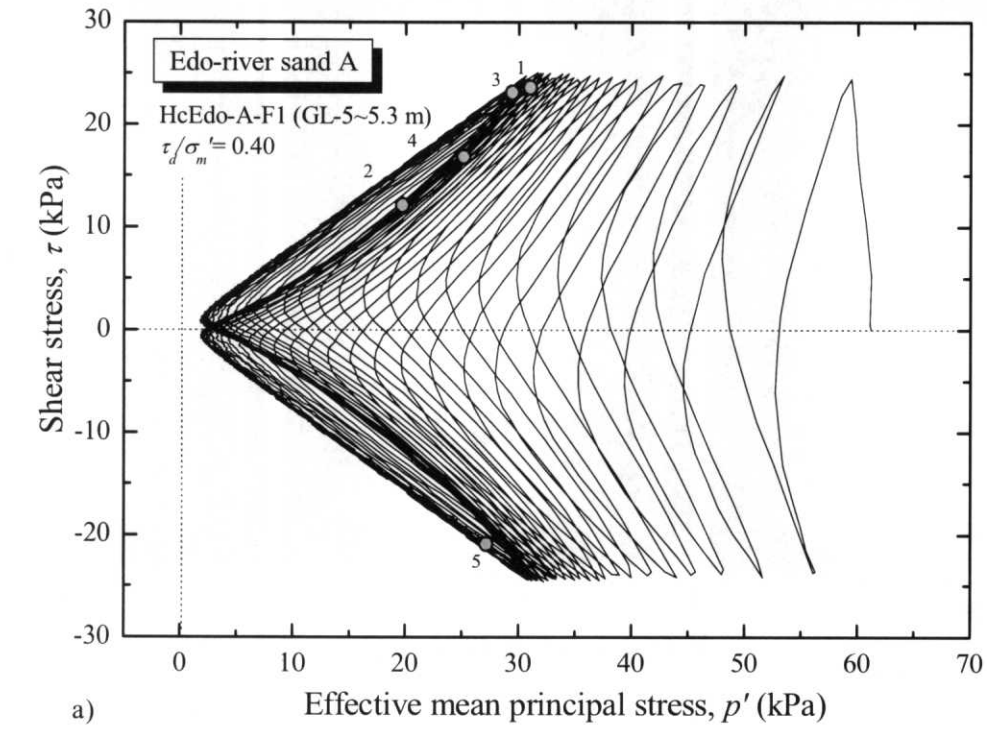
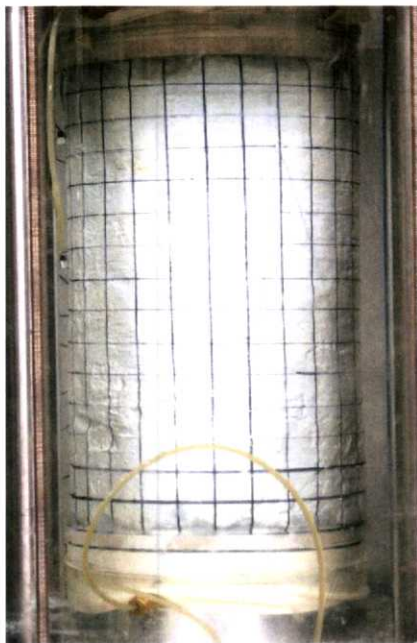
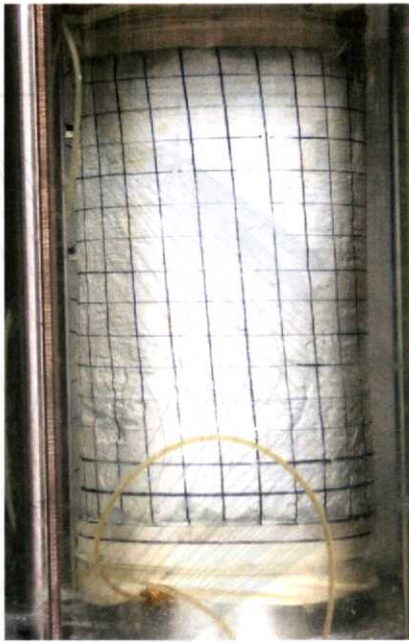


図6.5.1 江戸川砂A凍結試料 (HcEdo-A-F1) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前
原位置凍結採取試料
(沖積層)



1: $\gamma = 5\%$
供試体の変形は概ね一様。



2: $\gamma = 10\%$
剛性回復後の除荷時の様子。
供試体の変形は概ね一様だが、上部付近に細かなしわが発生。



3: $\gamma = 15\%$
供試体中心部から上部にかけて、細かいしわが発生。上部水平方向にせん断層が認められる。



4: $\gamma = 20\%$
剛性回復後の除荷時の様子。
供試体中心部から上部にかけて、変形の局所化が認められる。



5: $\gamma = -26\%$
供試体下部の変形は小さく、中部から上部にかけて大きい。変形の局所化が数箇所で見られる。

写真6.5.1 江戸川砂A凍結試料 (HcEdo-A-F1) の液状化試験中の様子

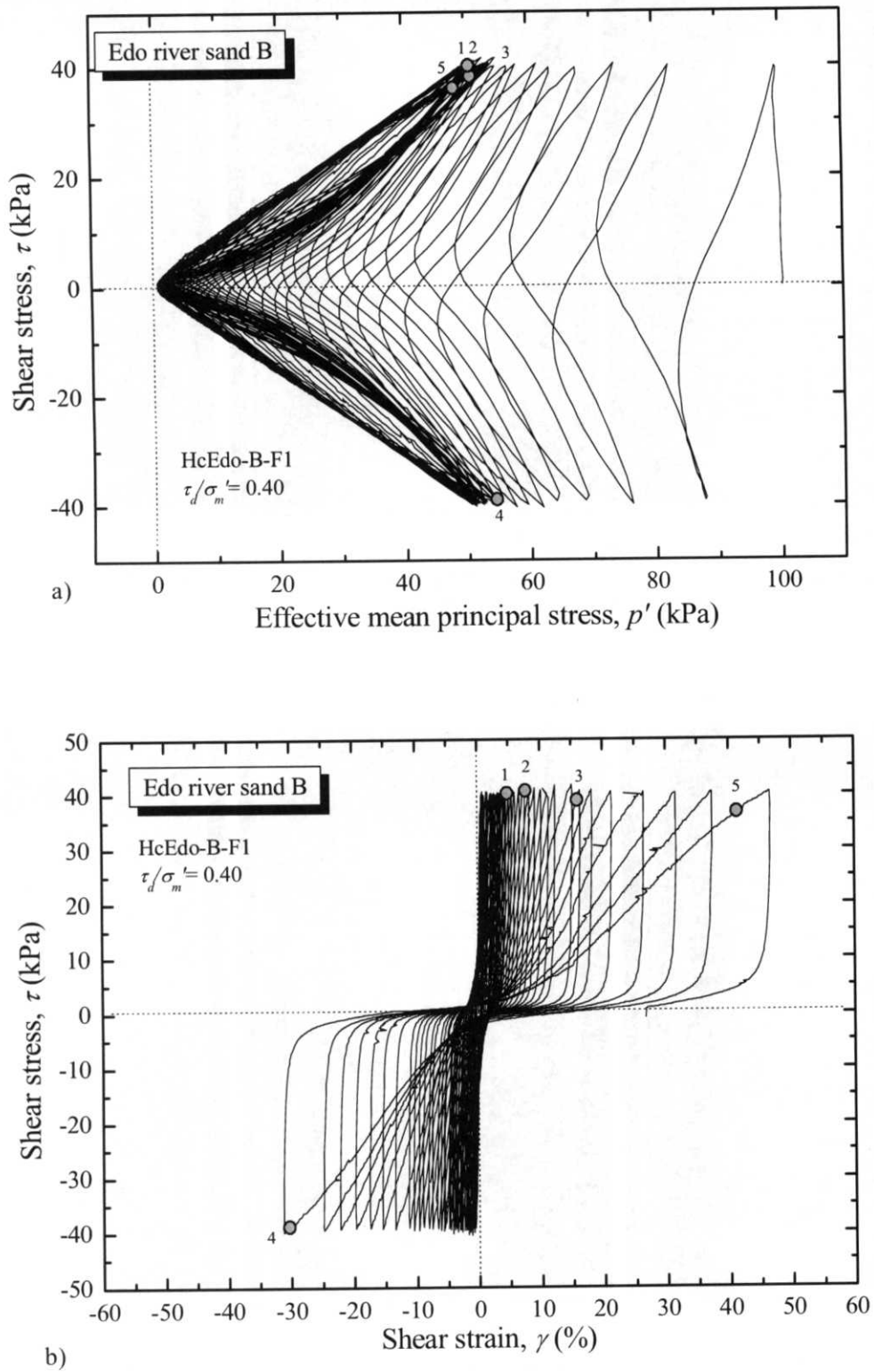


図6.5.2 江戸川砂B凍結試料 (HcEdo-B-F1) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前
原位置凍結採取試料
(洪積層)



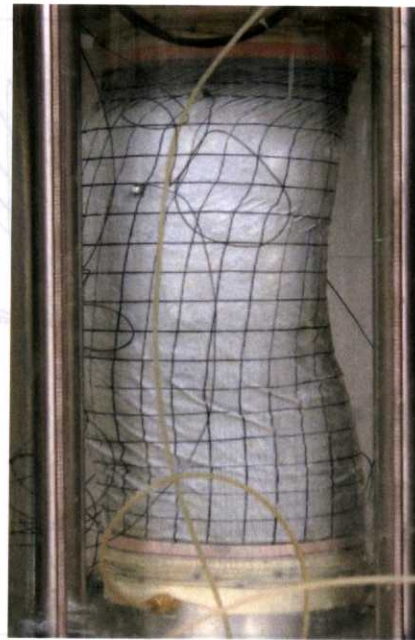
1: $\gamma = 5\%$
供試体の変形は概ね一様。若干下部の変形が大きい。



2: $\gamma = 7\%$
供試体下部の変形が大きくなる。くの字型の変形。



3: $\gamma = 15\%$
供試体がねじれ、歪んでいる。中部から下部にかけてしわが発生。上端部に変形が集中する。



4: $\gamma = 30\%$
正方向の変形が、負方向に戻らないため、供試体歪みが大きくなる。中央上部に大きなせん断層。上端部に変形集中



5: $\gamma = 40\%$
供試体大きく歪む。変形は上端部に集中し、中央上部にせん断層発達、局所化。中央下部一定幅にしわが多くある。

写真6.5.2 江戸川砂B凍結試料 (HcEdo-B-F1) の液状化試験中の様子

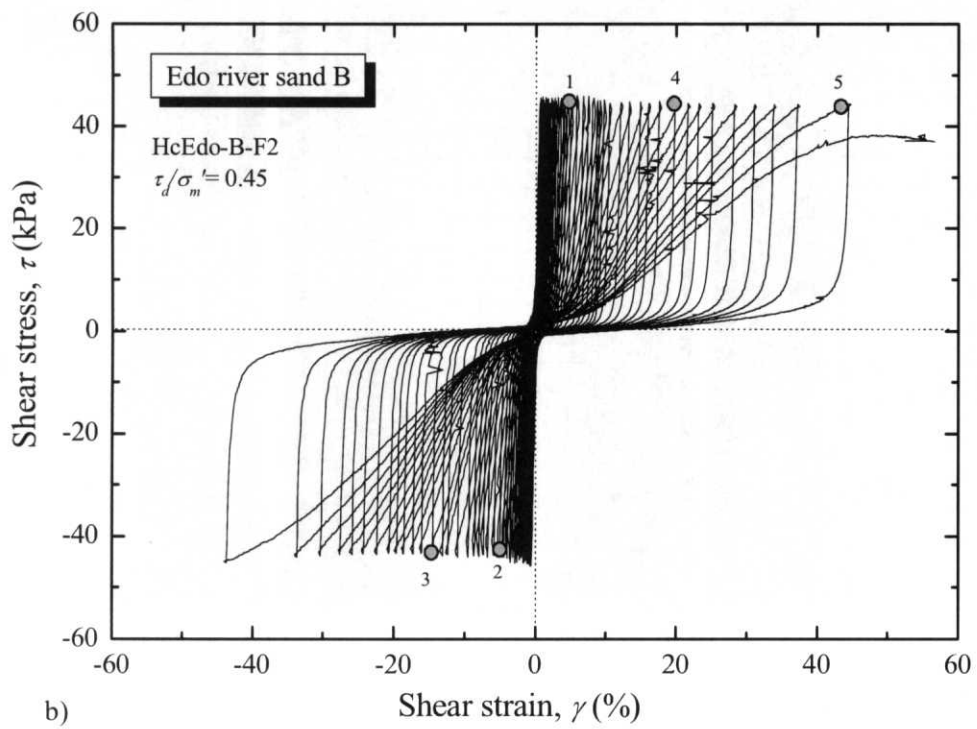
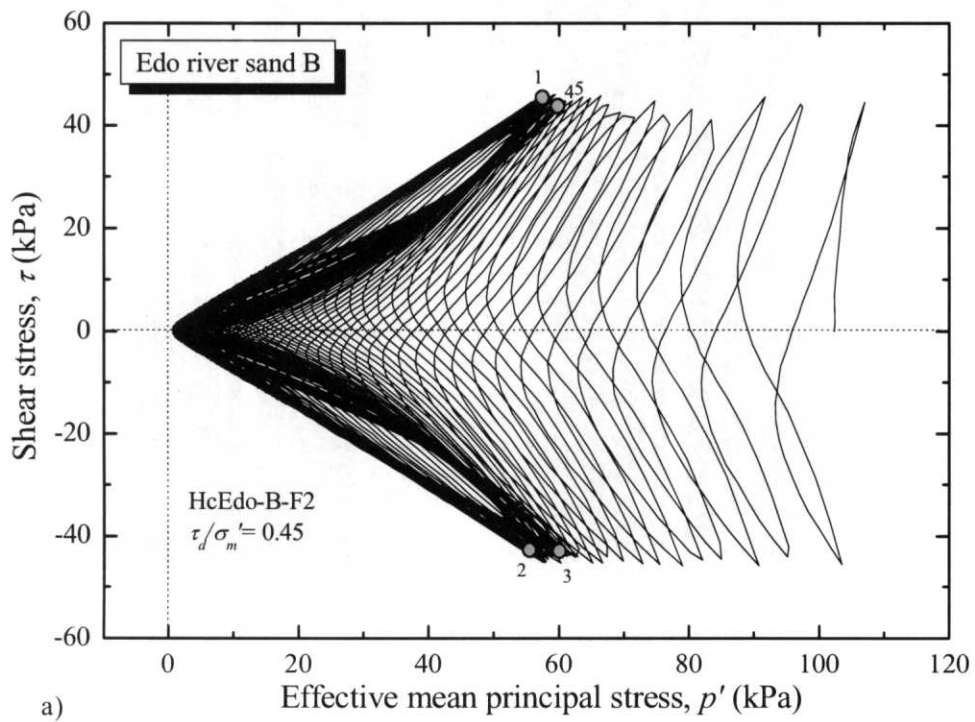
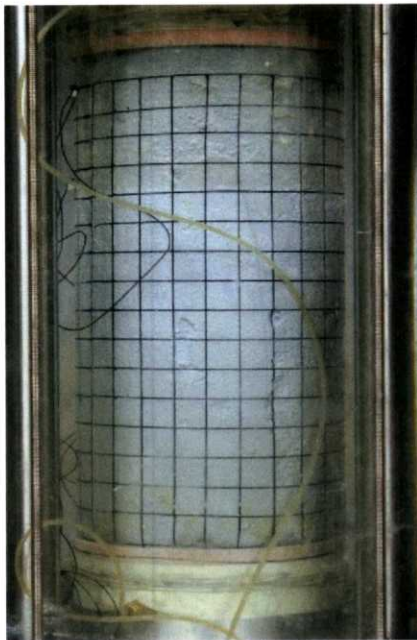
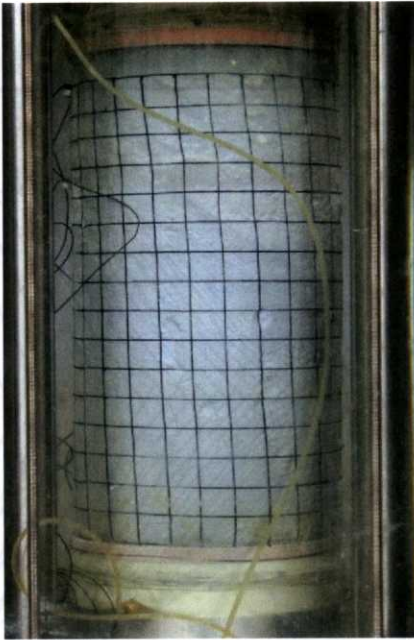


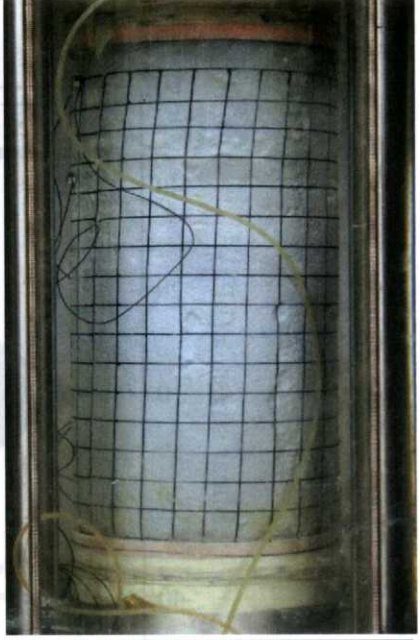
図6.5.3 江戸川砂B凍結試料 (HcEdo-B-F2) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前
原位置凍結採取試料
(洪積層)



1: $\gamma = 5\%$
供試体の変形は概ね一様。



2: $\gamma = -5\%$
供試体の変形は概ね一様。



3: $\gamma = -14\%$
上端部に変形が集中。上部にせん断層が入る。中部から下部にかけてしわが発生。



4: $\gamma = 20\%$
供試体は歪む。上部に3と逆方向の大きなせん断層が認められる。中部から下部にかけてしわが×印を形成。



5: $\gamma = 45\%$
供試体大きく歪む。変形は上端部に集中。上部にせん断層が数本ある。中央下部にしわが多くあり、4より明瞭。

写真6.5.3 江戸川砂B凍結試料 (HcEdo-B-F2) の液状化試験中の様子

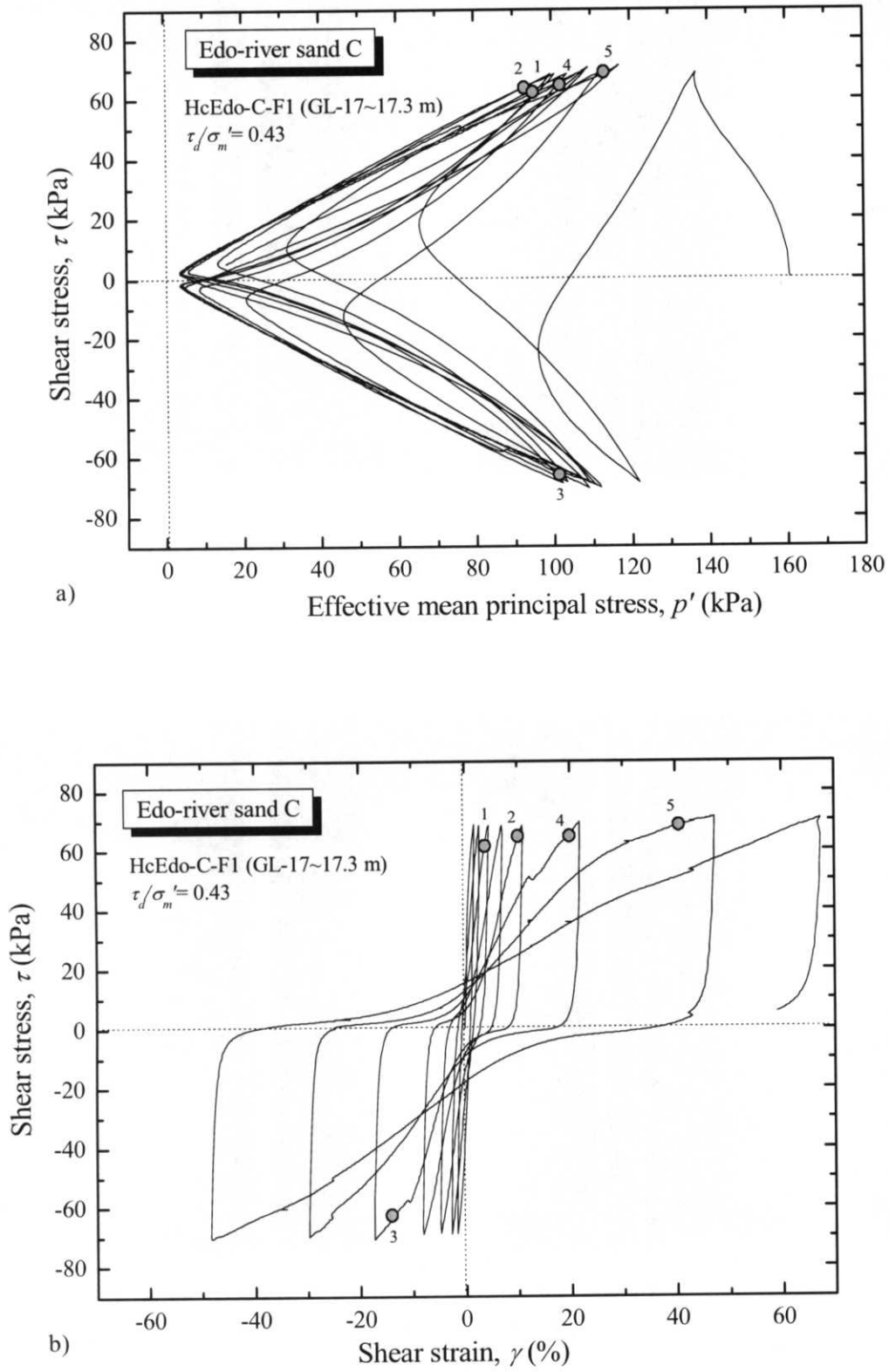


図6.5.4 江戸川砂C凍結試料 (HcEdo-C-F1) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前
原位置凍結採取試料
(洪積層)



1: $\gamma = 4\%$
供試体の変形は概ね一様。



2: $\gamma = 10\%$
供試体中央下部にせん断層が認められる。供試体は若干歪んでいる。



3: $\gamma = -15\%$
供試体中央から下部にかけて、せん断層が発達。変形の局所化が数箇所認められる。

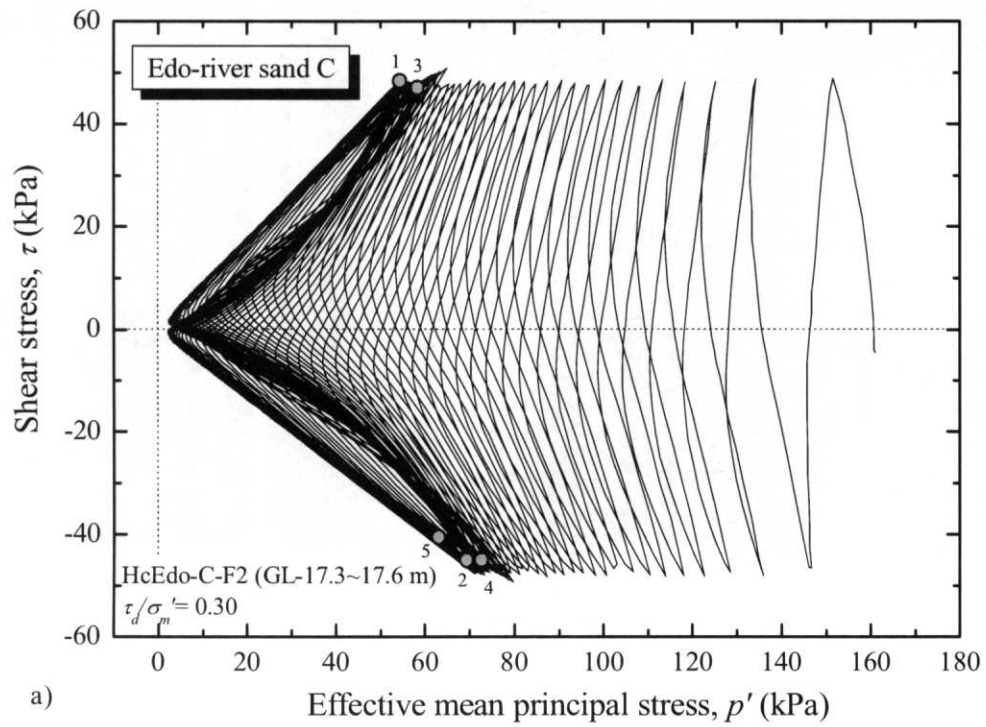


4: $\gamma = 20\%$
供試体歪む。上部・下部それぞれに逆方向のせん断層が入り、変形局所化。

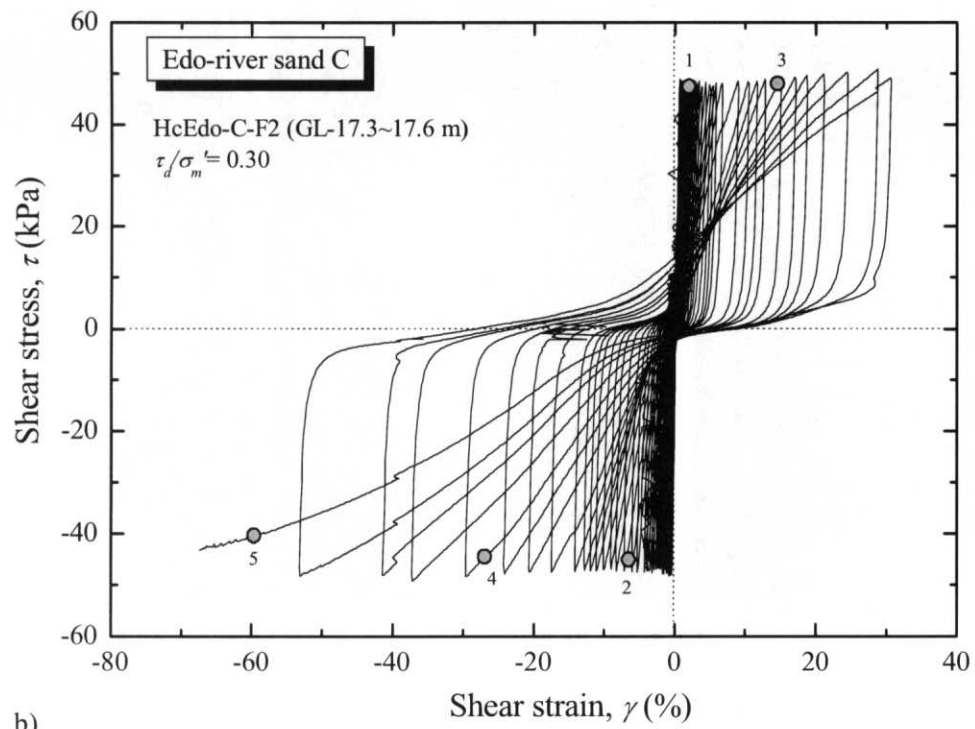


5: $\gamma = 40\%$
供試体大きく歪む。全体に変形の局所化が認められるが、上部において顕著である。下部に明瞭な不連続面が発達。

写真6.5.4 江戸川砂C凍結試料 (HcEdo-C-F1) の液状化試験中の様子

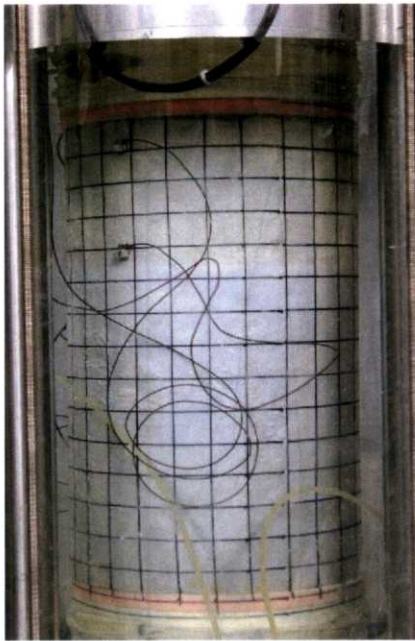


a)

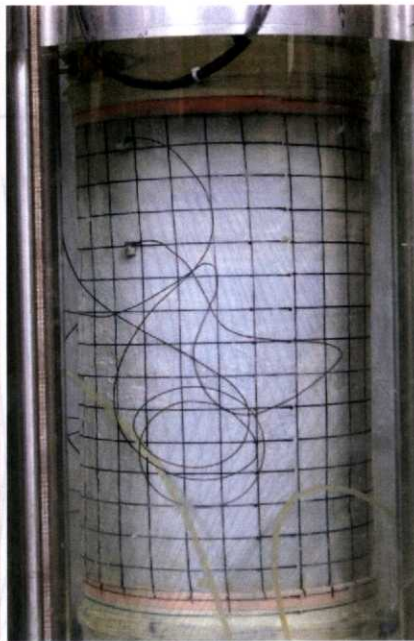


b)

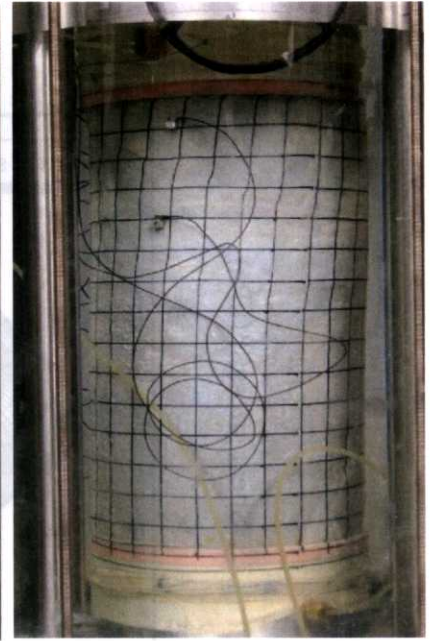
図6.5.5 江戸川砂C凍結試料 (HcEdo-C-F2) のa) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



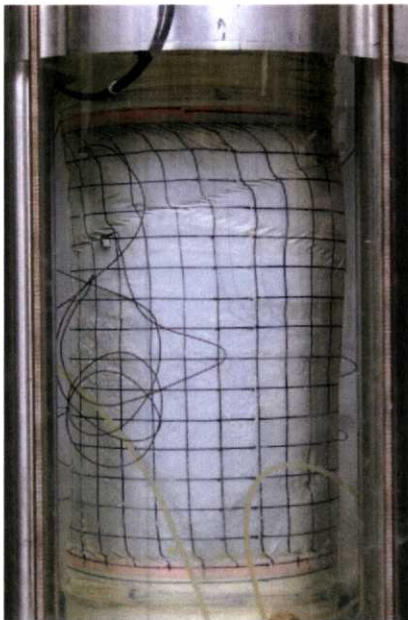
液状化試験前
原位置凍結採取試料
(洪積層)



1: $\gamma = 3\%$
供試体の変形は概ね一様。



2: $\gamma = -7\%$
変形は概ね一様であるが、上部に僅かながら局所化が認められる。



3: $\gamma = 15\%$
供試体上部にせん断層が両方向に発達。上端部・下端部に変形が集中し始める



4: $\gamma = -25\%$
供試体中央から上部にかけて比較的明瞭なせん断層。変形の局所化が認められる。下端部にも局所化あり。



5: $\gamma = -60\%$
上端部において変形が集中しており、供試体全体の変形は小さい。上部、下端部のせん断層でも局所化あり。

写真6.5.5 江戸川砂C凍結試料 (HcEdo-C-F2) の液状化試験中の様子

6.5.2 再構成試料の大ひずみ液状化試験

(1) 応力履歴のない再構成試料

本研究では、再構成試料の中空ねじり試験は、江戸川砂B, C試料を用いて実施した。ここでは、振動法により凍結試料と同等の密度になるよう調整した再構成試料の実験結果を示す。

各試料の代表的な結果として、図6.5.6、写真6.5.6に江戸川砂B試料(HcEdo-B-R1)、図6.5.7、写真6.5.7に江戸川砂C試料(Edo-C-R1)の有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。各写真は、各図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様子である。また、その他の試料については図6.5.8、図6.5.9に示す。

試験結果より、再構成試料は凍結試料と比較して繰返し载荷に伴う有効応力の低下が大きく、せん断ひずみの増加も非常に大きい。たとえば、江戸川砂B試料(HcEdo-B-R1, 図6.5.6, 写真6.5.6)については、相対密度 D_r は凍結試料より若干大きいものの、同程度のせん断応力比による凍結試料の結果(HcEdo-B-F1, 図6.5.2, 写真6.5.2)との対比により、液状化に対する抵抗は小さいといえる。再構成試料の液状化特性が凍結試料と顕著に異なる点については、第5章で示した三軸試験結果とも対応する。また、液状化中の供試体観察により、各再構成試料の液状化初期段階において認められる一様な変形を呈するせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ の領域は、凍結試料の場合と比較して大きい。しかし、再構成試料においても、繰返し载荷によりせん断ひずみが大きくなると、しわと共にせん断層が発現し、変形が局所化する。

表6.5.2に各再構成試料の所定の $\gamma_{(DA)}$ に達するまでに必要な繰返し回数を示す。全体的に試料の強度に対し、設定したせん断応力比が大きかったため比較的少ない繰返し回数でひずみが大きくなっているが、繰返し回数とせん断ひずみの関係は中密豊浦砂の結果と対応しており、緩い豊浦砂のような急激なひずみの増加は認められない。

表 6.5.2 応力履歴のない再構成試料の液状化試験結果

No.	D_r (%)	τ_d/σ'_m	繰返し回数 N_c				
			$\gamma_{(DA)}=4.5\%$	$\gamma_{(DA)}=10\%$	$\gamma_{(DA)}=30\%$	$\gamma_{(DA)}=60\%$	$\gamma_{(DA)}=100\%$
HcEdo-B-R1	88.0	0.41	0.8	1.6	6	11	-
HcEdo-B-R3	89.7	0.46	0.5	1	3.5	6.8	8.5
HcEdo-C-R1	88.0	0.22	4.5	5.1	6.7	9.2	12
HcEdo-C-R2	92.4	0.17	4.7	5.1	6.1	7.8	11

- : ケーブル脱落

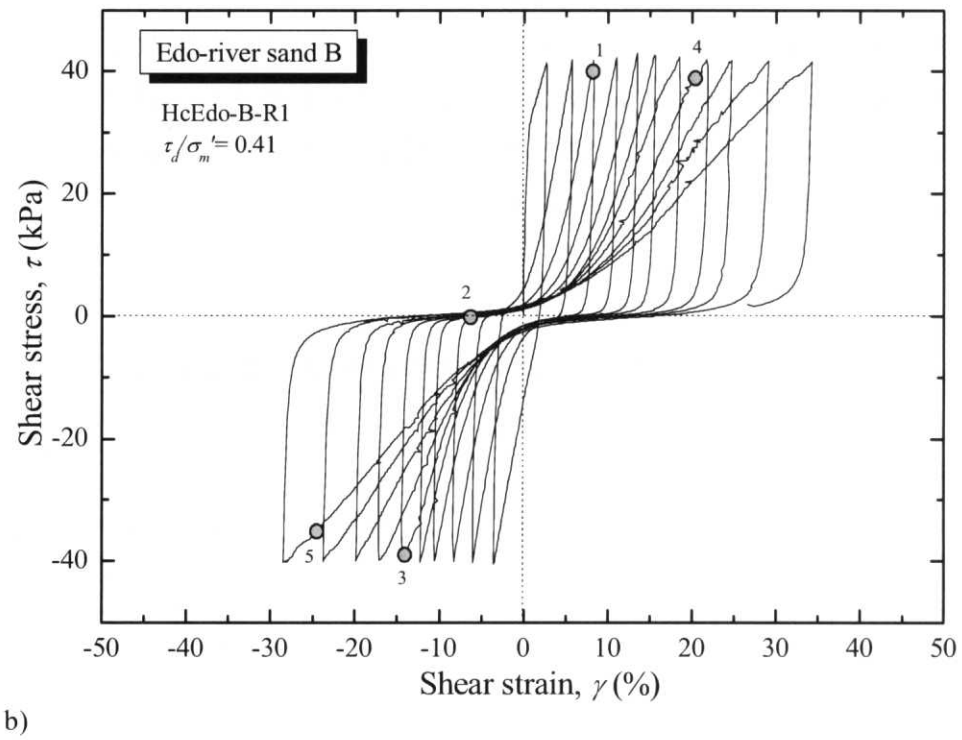
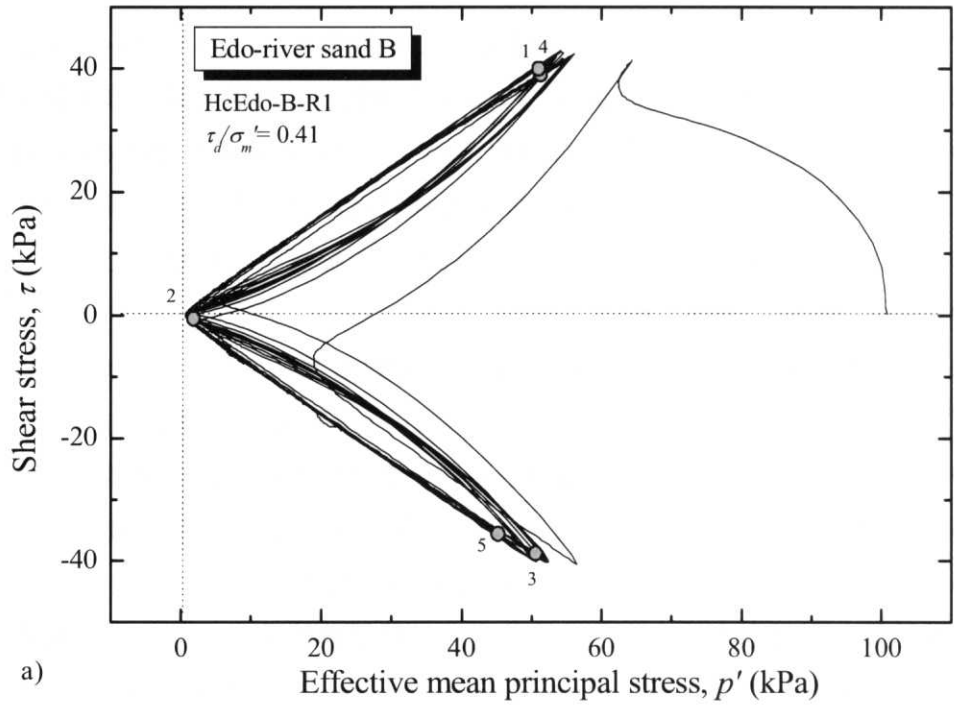
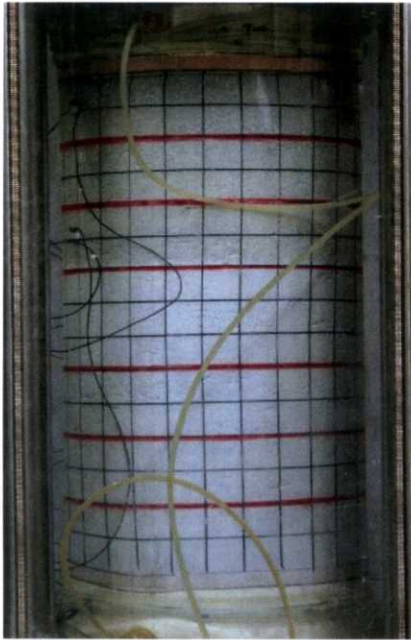
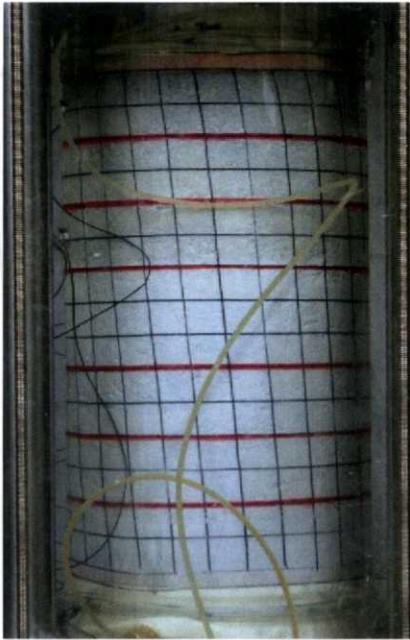


図6.5.6 応力履歴のない江戸川砂B再構成試料（HcEdo-B-R1）の
 a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前
 応力履歴のない再構成試料
 (洪積層)



1: $\gamma = 8\%$
 供試体の変形は概ね一様。



2: $\gamma = -7\%$
 剛性回復後の除荷時の様子。
 供試体の変形は概ね一様だが、
 左側面・下端部付近に細かなしわが発生。



3: $\gamma = -15\%$
 供試体中央部・下部にしわが多く発生し×印を形成。上端部に变形が集中。



4: $\gamma = 20\%$
 供試体中央から上部にかけて比較的明瞭なせん断層。変形の局所化が認められる。



5: $\gamma = -25\%$
 上端部において変形が集中。中央から上部にかけて明瞭なせん断層が発達し、局所化。供試体が歪んでいる。

写真6.5.6 応力履歴のない江戸川砂B再構成試料 (HcEdo-B-R1) の液状化試験中の様子

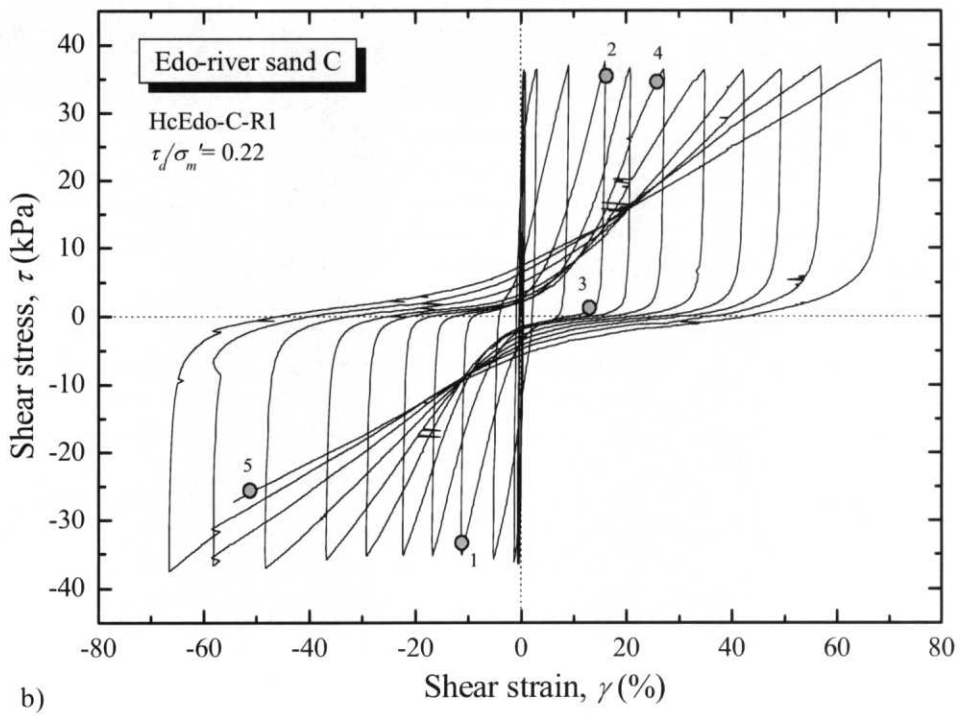
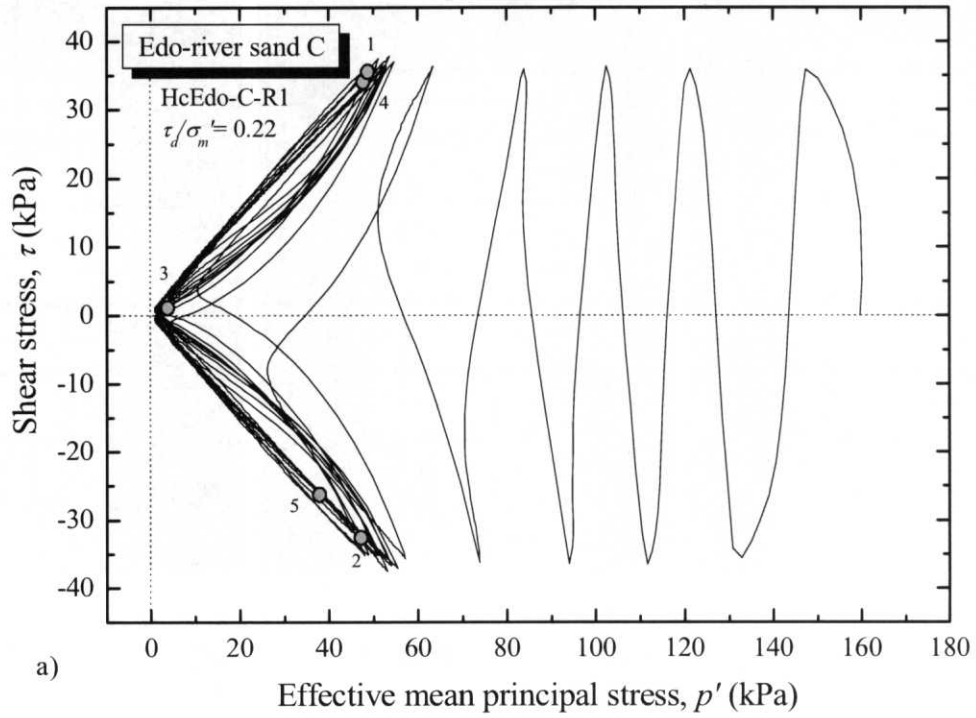
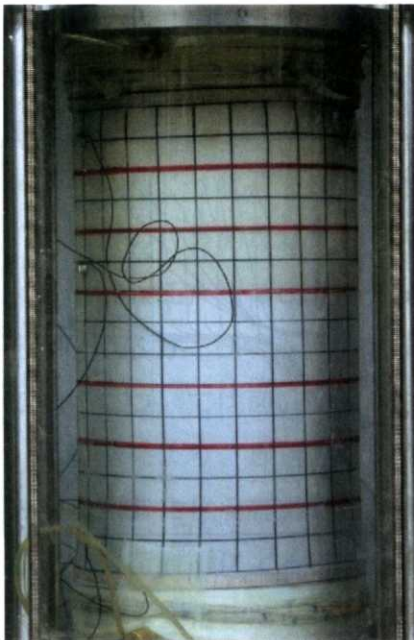
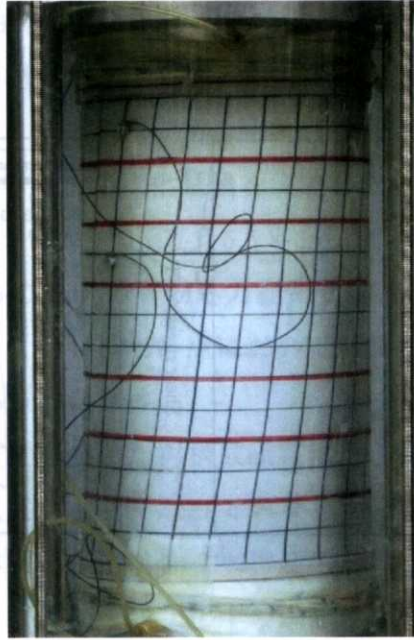


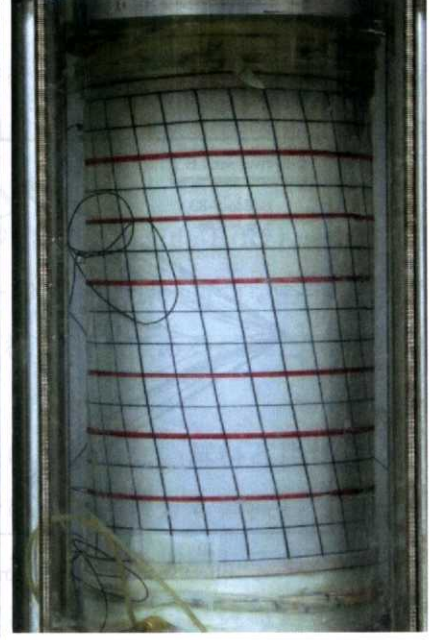
図6.5.7 応力履歴のない江戸川砂C再構成試料（HcEdo-C-R1）の
a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



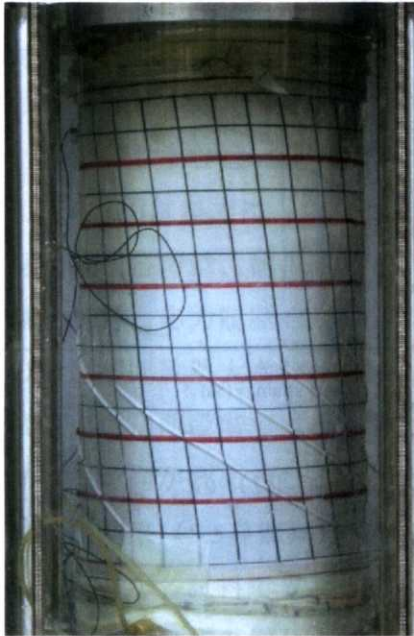
液状化試験前
 応力履歴のない再構成試料
 (洪積層)



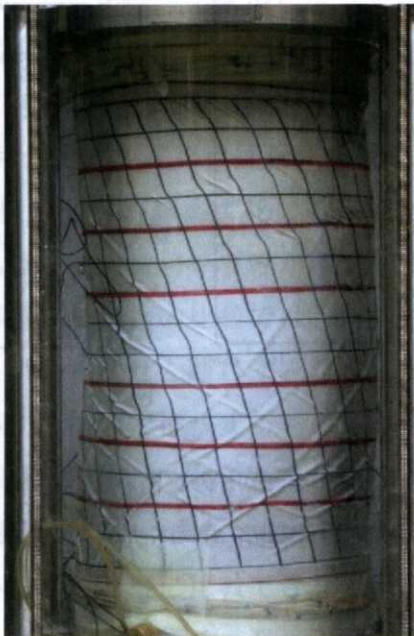
1: $\gamma = 10\%$
 供試体の変形は概ね一様。



2: $\gamma = 16\%$
 1 の逆振りの様子。供試体の
 変形は概ね一様。



3: $\gamma = 12\%$
 2 の除荷後の様子。供試体中
 央下部付近に細いが明瞭な
 なしわが発生。



4: $\gamma = 26\%$
 供試体中央部から下部にか
 けてしわが多数発生、×印を
 形成。上部にせん断層が発
 生。



5: $\gamma = 50\%$
 上端部において変形が集中。
 供試体は全体的に歪む。中央
 から下部にかけてせん断層
 発生。

写真6.5.7 応力履歴のない江戸川砂C再構成試料 (HcEdo-C-R1) の液状化試験中の様子

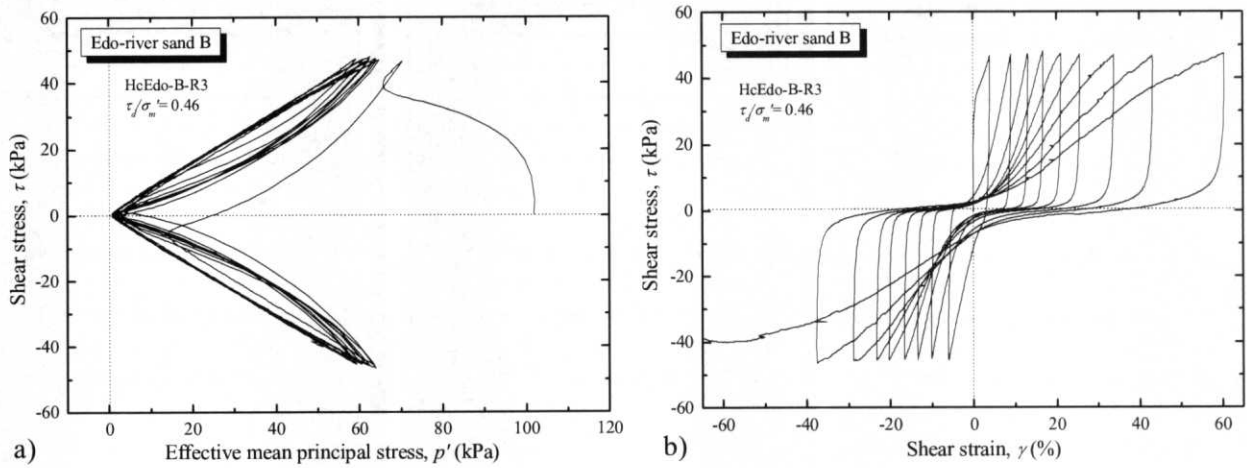


図6.5.8 応力履歴のない江戸川砂B再構成試料 (HcEdo-B-R3) の

a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

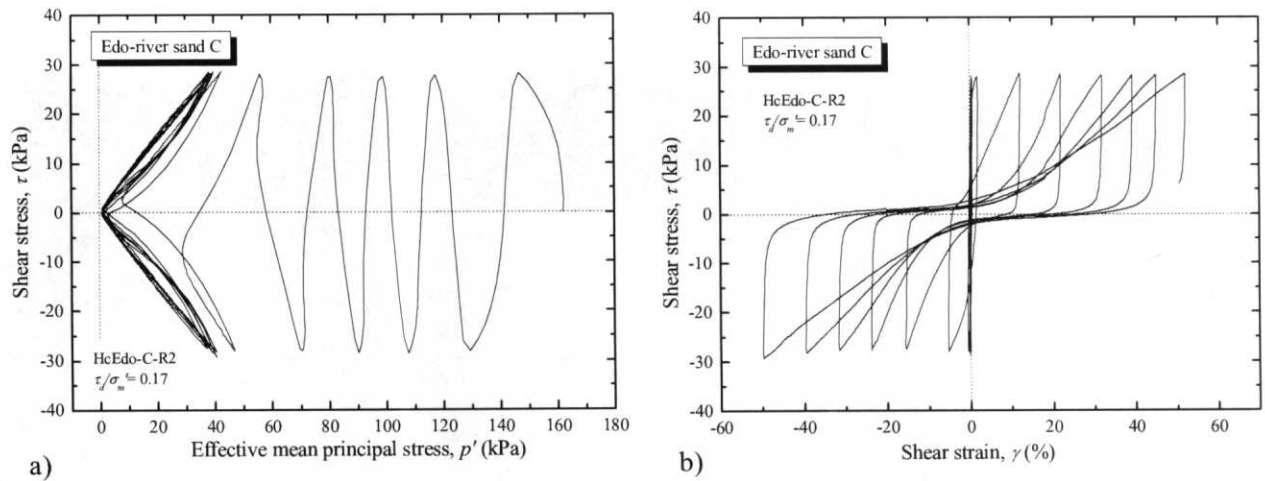


図6.5.9 応力履歴のない江戸川砂C再構成試料 (HcEdo-C-R2) の

a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

(2) 応力履歴を受けた再構成試料

第5章の三軸試験結果より、再構成試料に排水繰返し載荷履歴を与えることで液状化強度が増加することを示した。ここでは、(1)と同じ方法で作成した再構成試料に排水条件で $\gamma_{(DA)}=0.2\%$ の繰返しねじり載荷を20,000回与え、液状化試験を実施した。

各試料の代表的な結果として、図6.5.10、写真6.5.8に江戸川砂B試料 (HcEdo-B-R2)、図6.5.11、写真6.5.9に江戸川砂C試料 (Edo-C-R4) の有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。各写真は、各図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様子である。また、その他の試料については図6.5.12、図6.5.13に示す。

試験結果より、繰返し載荷履歴を受けた再構成試料は、前述の履歴のない試料と比較して、繰返し載荷に伴う有効応力の低下が小さくなっており、せん断ひずみの増分も低減している。繰返し載荷履歴による供試体体積の変化は1~2%程度であったが、それを加味しても液状化特性は大きく変化したといえよう。また、液状化中の供試体観察により、各再構成試料の液状化初期段階において認められる一様な変形を呈するせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ の領域は、応力履歴のない再構成試料よりも小さく、むしろ凍結試料に近い傾向を呈する。ひずみレベルが大きくなったときの供試体の挙動としては、応力履歴のない再構成試料や凍結試料と同様、供試体上端部のキャップ付近に変形が集中するほか、供試体にもしわとせん断層が発現し、変形の局所化が生じている。また最終的には供試体は局所変形により歪むが、凍結試料（例えば写真6.5.2、写真6.5.4）に見られたような大きな歪みは確認されず、どちらかといえば応力履歴のない試料の変形に近い。

表6.5.3および図6.5.14に、江戸川砂B, C試料の繰返し回数と $\gamma_{(DA)}$ の関係を示す。図6.5.14 a)の江戸川砂B試料では、いずれも同等のせん断応力比の結果を比較しているが、応力履歴のない再構成試料では、他の試料と比較して急激にひずみが増加している様子がうかがえる。また、凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料との比較では、再構成試料の方が大ひずみに至るまでの繰返し回数は大きい。しかし、徐々にせん断ひずみが増加する凍結試料と比較して、再構成試料では初期段階では小さいひずみ振幅で推移するものの、途中から急激にせん断ひずみが増加する傾向が認められる。応力履歴を受けた再構成試料のこのような傾向は、第5章で示した三軸試験結果（5.5参照）からも確認された。また、図6.5.14 b)に示した江戸川砂C試料では、応力比振幅が各試料で異なっているため一概に比較できないが、応力履歴を受けた再構成試料では、せん断ひずみ増分 $\Delta\gamma$ の変化が比較的大きく、江戸川砂B試料と同様の傾向が認められる。

なお、図6.5.15に $\gamma_{(DA)}=60\%$ に達したときの繰返し回数で正規化した N_c とせん断ひずみ $\gamma_{(DA)}$ の関係を示すが、上述の傾向が顕著に現れていることが確認できる。

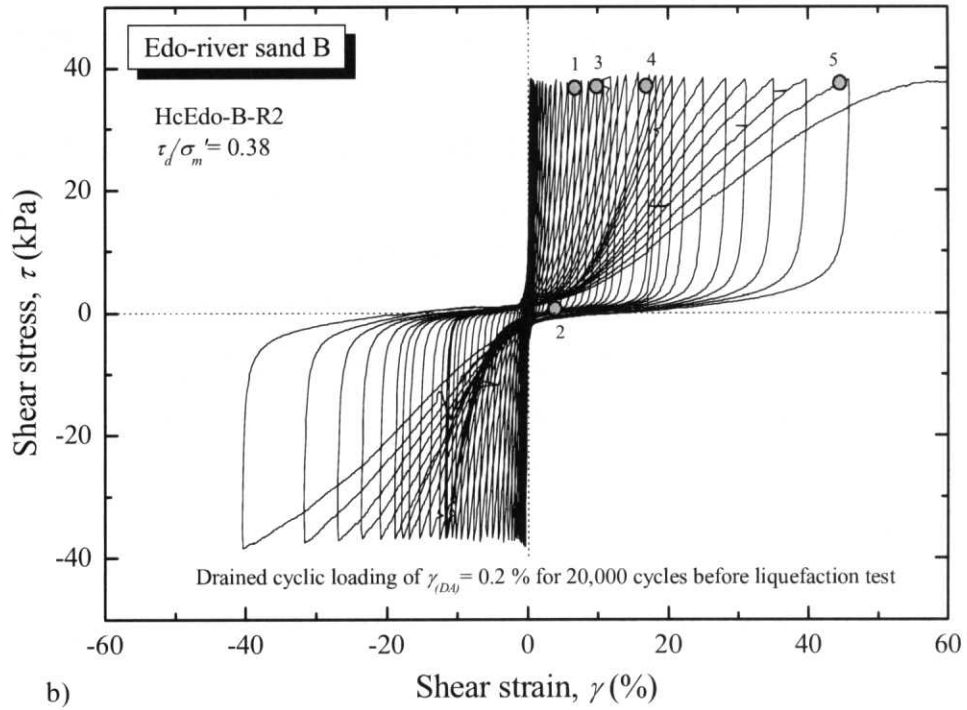
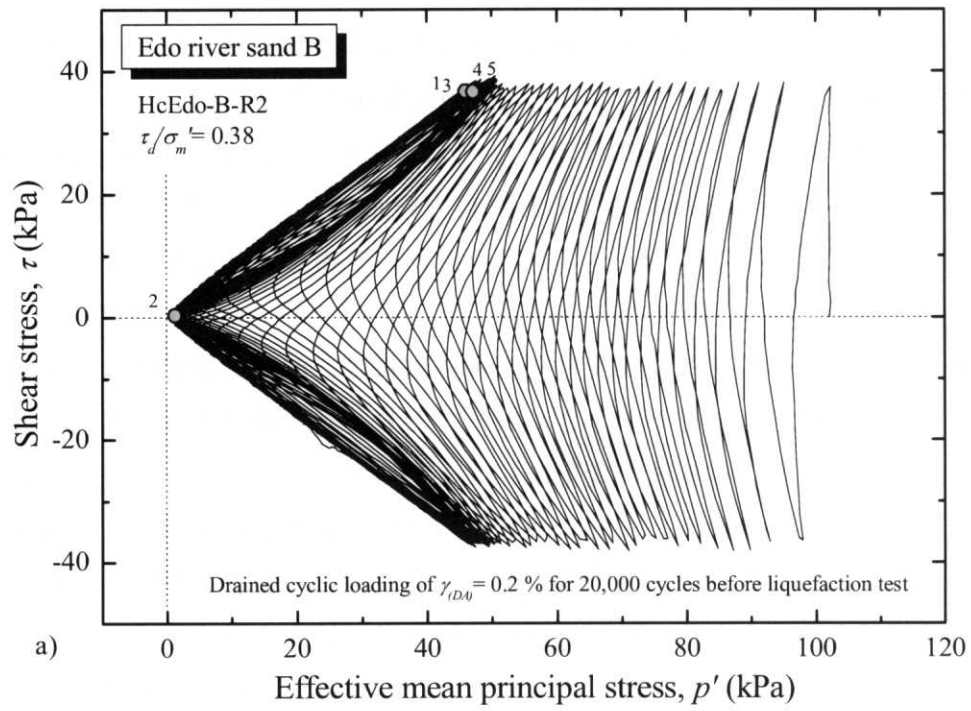
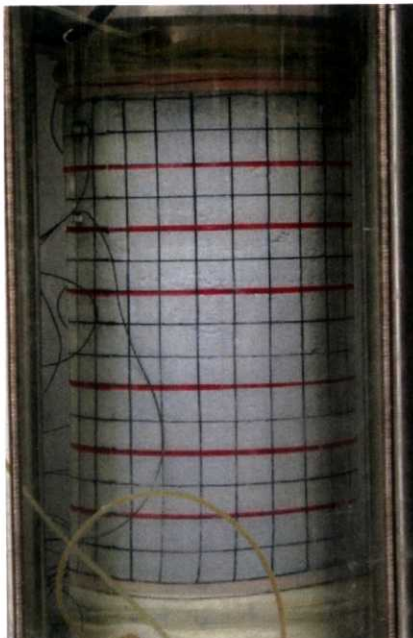
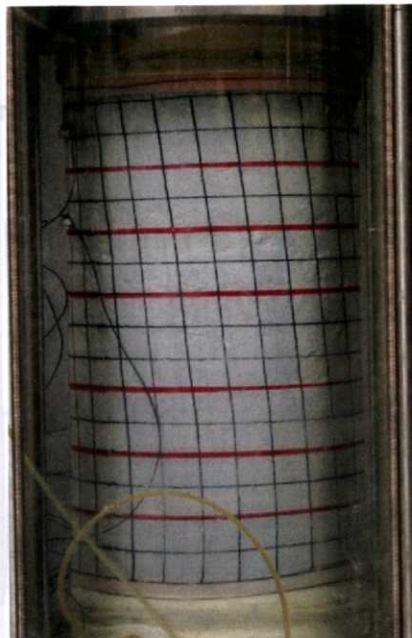


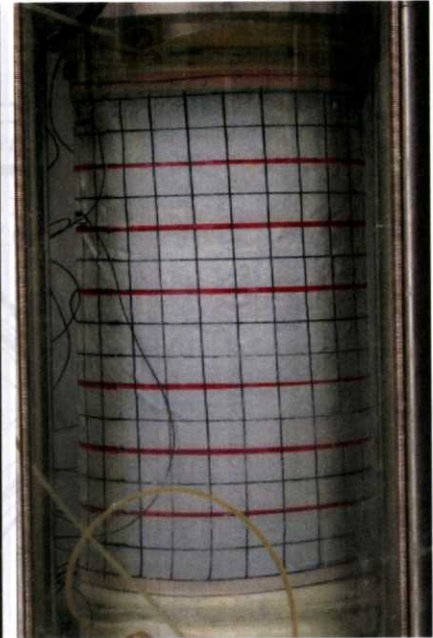
図6.5.10 応力履歴を受けた江戸川砂B再構成試料（HcEdo-B-R2）の
a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



液状化試験前
再構成試料（洪積層）
（応力履歴：20,000 CL）



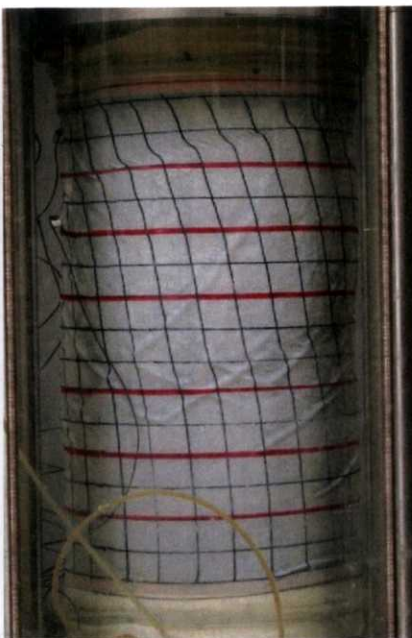
1: $\gamma = 7.5\%$
供試体の変形は概ね一様であるが、変形量は下部より上部の方が大きい。



2: $\gamma = 5\%$
1 の除荷後の様子。供試体左側面・中央部付近に細かなしわが発生。



3: $\gamma = 10\%$
供試体中央部にしわが多く発生し×印を形成。



4: $\gamma = 18\%$
供試体中央部・上部にせん断層が発生。特に上部において局所化が認められる。



5: $\gamma = 44\%$
上端部において変形が集中。中央部のせん断層でも変形が局所化。その他の場所では変形量少ない。

写真6.5.8 応力履歴を受けた江戸川砂B再構成試料（HcEdo-B-R2）の液状化試験中の様子

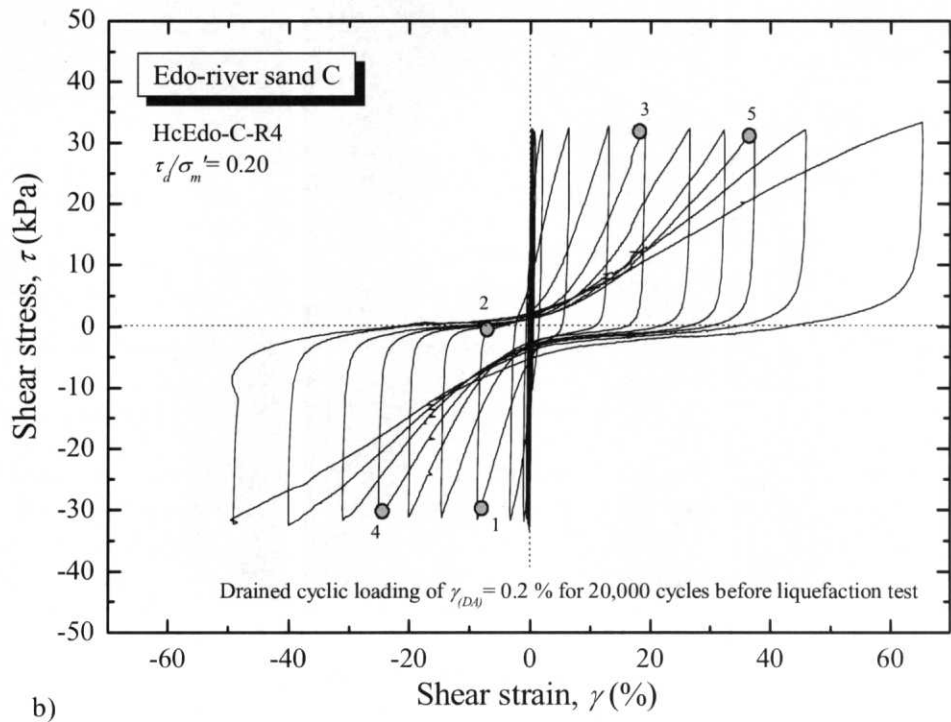
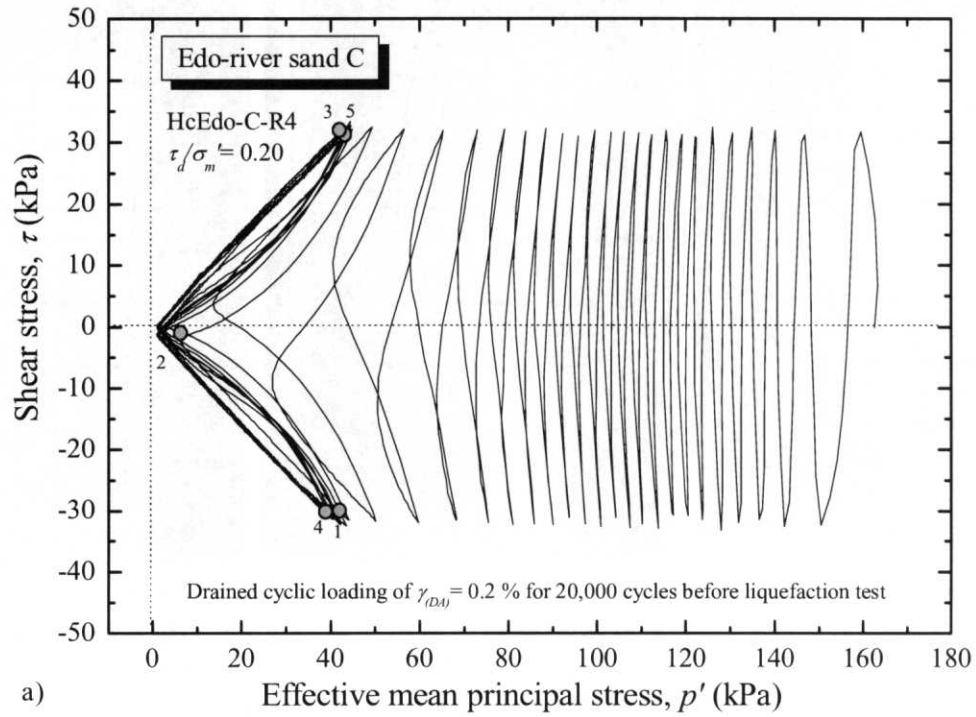
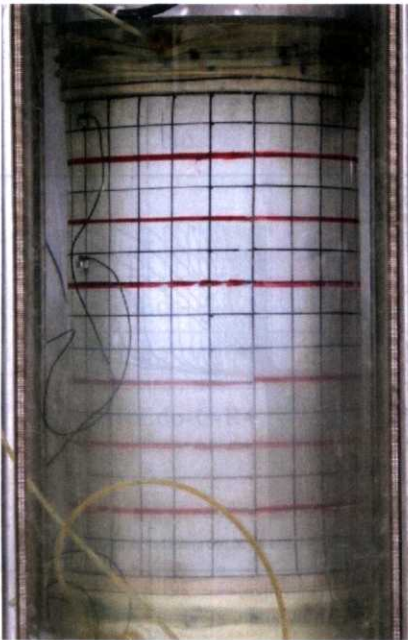
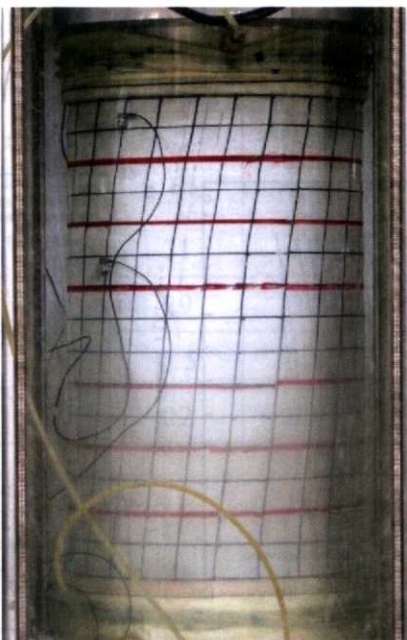


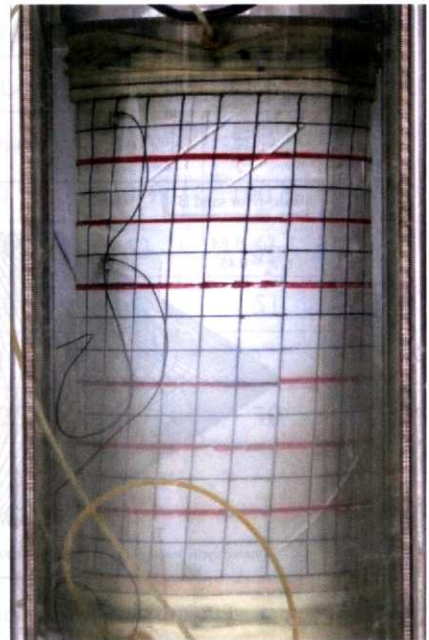
図6.5.11 応力履歴を受けた江戸川砂C再構成試料（HcEdo-C-R4）の
a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係



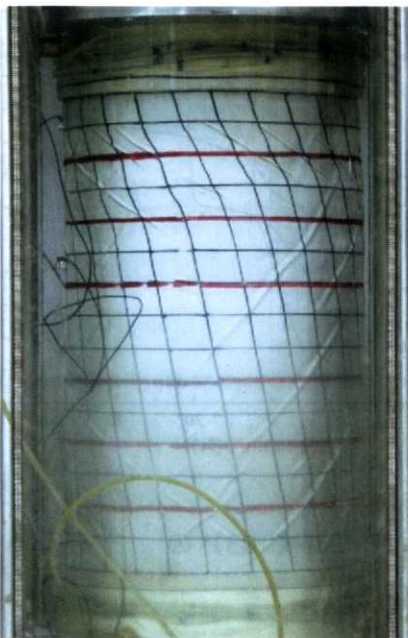
液状化試験前
再構成試料（洪積層）
（応力履歴：20,000 CL）



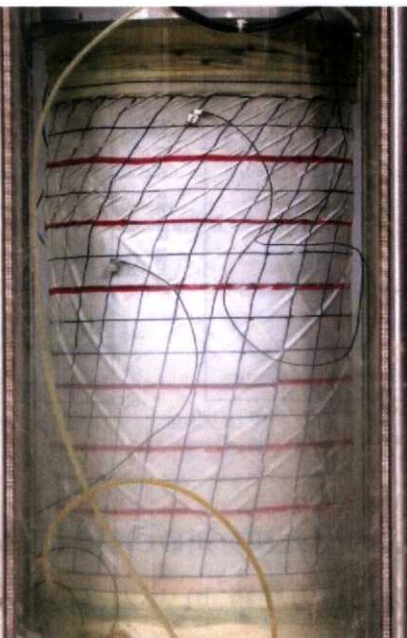
1: $\gamma = -8.5\%$
供試体の変形は概ね一様。



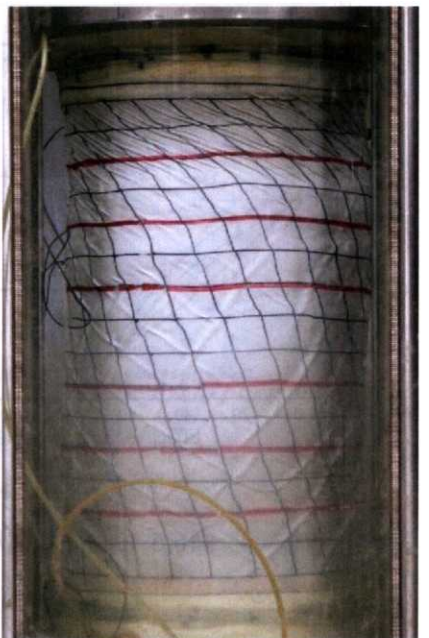
2: $\gamma = -7\%$
1 の除荷後の様子。供試体中央上部・下部付近に細いが明瞭ななしわが発生。



3: $\gamma = 19\%$
しわが供試体全体に増える。上部に変形の局所化が認められる。



4: $\gamma = -25\%$
変形は供試体全体で生じているが、特に上部 30% の範囲で大きい。しわが供試体全体に発達。



5: $\gamma = 37\%$
上端部において変形が集中。供試体の歪みは比較的小さい。全体的にしわが多い。

写真6.5.9 応力履歴を受けた江戸川砂C再構成試料（HcEdo-C-R4）の液状化試験中の様子

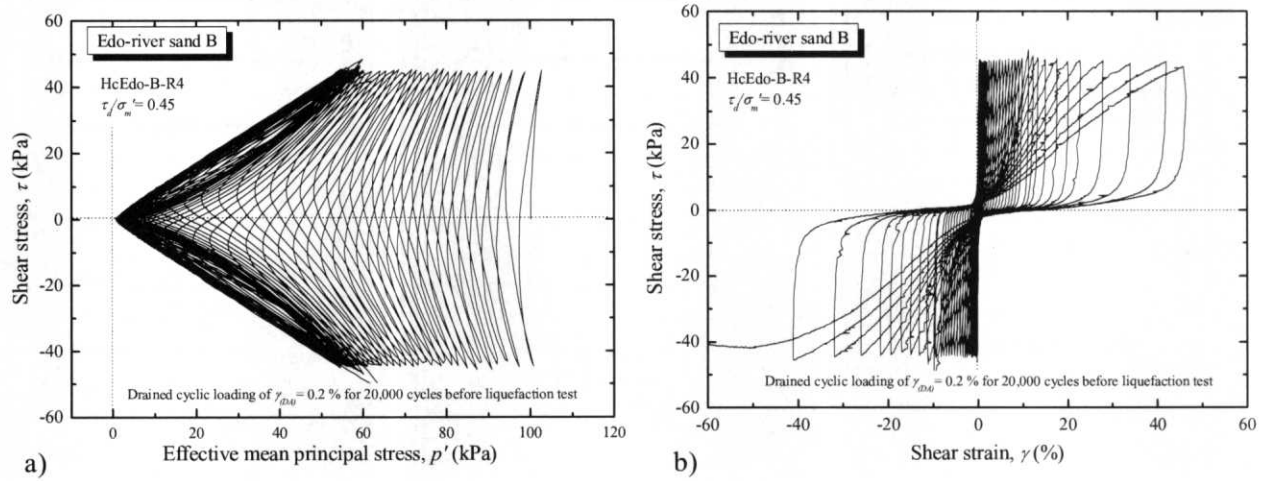


図6.5.12 応力履歴を受けた江戸川砂B再構成試料 (HcEdo-B-R4) の

a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

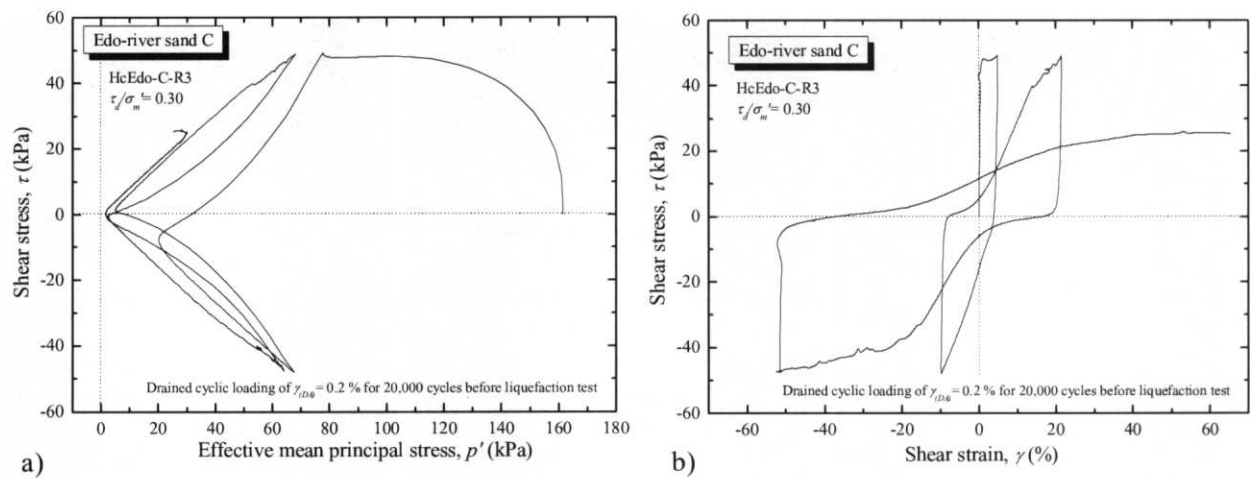


図6.5.13 応力履歴を受けた江戸川砂C再構成試料 (HcEdo-C-R3) の

a) 有効応力経路, b) 応力-ひずみ関係

表 6.5.3 応力履歴を受けた再構成試料の液状化試験結果

No.	D_r (%)	τ_d/σ'_m	繰返し回数 N_c				
			$\gamma_{(DA)} = 4.5\%$	$\gamma_{(DA)} = 10\%$	$\gamma_{(DA)} = 30\%$	$\gamma_{(DA)} = 60\%$	$\gamma_{(DA)} = 100\%$
HcEdo-B-R2	94.5	0.38	31	35	46	53	56
HcEdo-B-R4	97.2	0.45	29	34	44	49	51
HcEdo-C-R3	91.2	0.30	0.5	0.8	1.5	1.8	2.3
HcEdo-C-R4	98.5	0.20	22	23	25	27	30

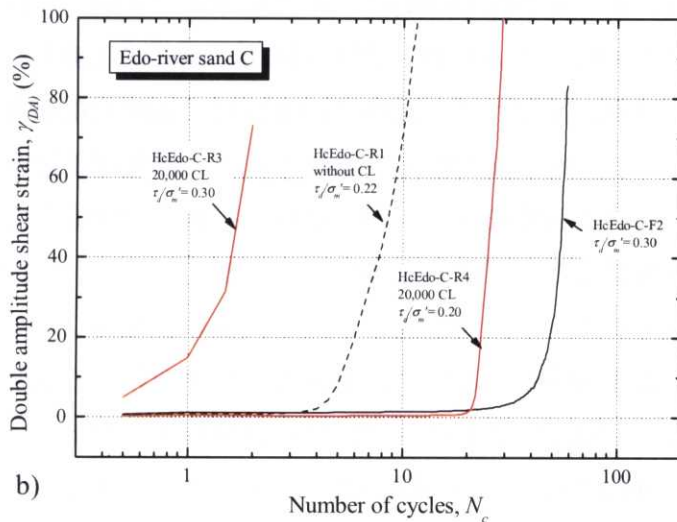
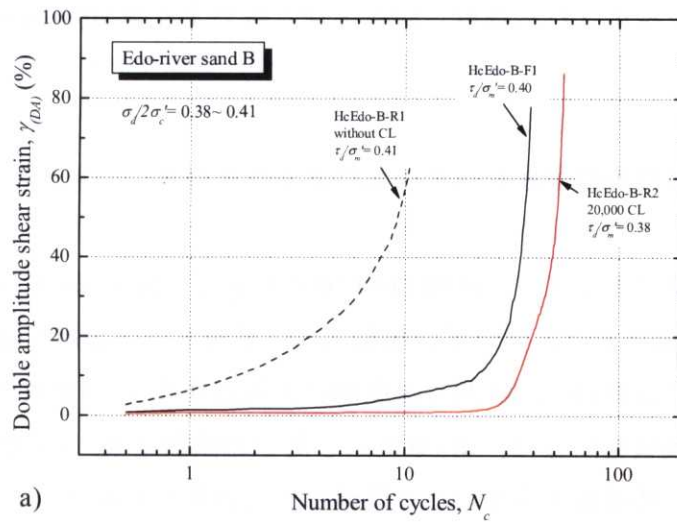


図6.5.14 各試料の繰返し回数と両せん断ひずみ振幅の関係

a) 江戸川砂B試料, b) 江戸川砂C試料

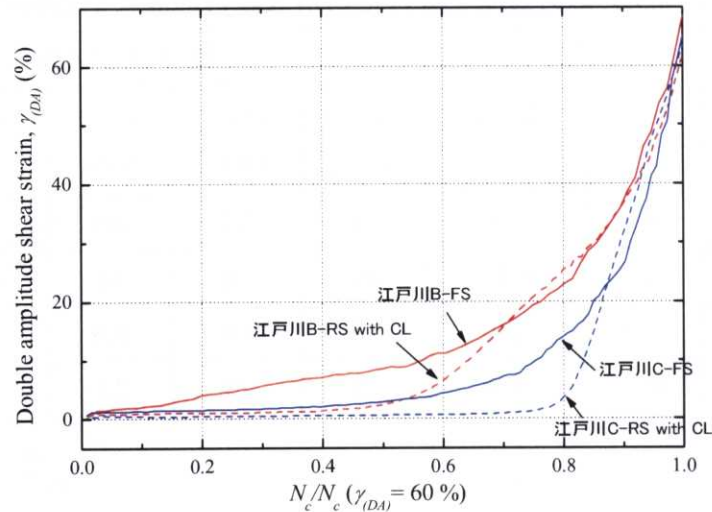


図6.5.15 各試料の凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の正規化された繰返し回数とせん断ひずみ両振幅の関係

6.5.3 原位置採取試料の大ひずみレベルにおける液状化強度

(1) 江戸川砂B試料

大ひずみ液状化試験による江戸川砂B試料の液状化強度曲線を図6.5.16に示す。また、各試料の液状化強度 R_{L15} （所定の両せん断ひずみ振幅 $\gamma_{(DA)}$ 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、液状化試験直前に計測した動的せん断剛性率 G_{d0} の結果を表6.5.4に示す。

中空ねじり試験の液状化曲線は、第5章に示した三軸試験結果（5.3参照）も参考にして設定している。しかし、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度については、必ずしも整合しないという報告がある。山下&土岐（1991）は、様々な方法で作成した砂試料の三軸試験と中空試験による液状化強度を比較しているが、試料の種類、作成法によりその相互関係は異なり、同じ方法で作成しても試料が異なれば、試験法の違いによる液状化強度曲線の傾向は異なると報告している。参考までに、山下&土岐（1991）によると、原位置不攪乱試料（石狩砂）では三軸試験の方が若干高い液状化強度を示し、同じ試料を振動法で作成した場合、試験機の違いが液状化強度に及ぼす影響はほとんどないと報告している。しかし、別の原位置採取試料（当別砂）では、中空試験結果のほうが三軸試験より若干大きいと報告している。このように、三軸試験と中空試験結果の関係は明確でないが、本研究では中空ねじり試験に用いた凍結試料数が十分ではないことから、三軸試験結果は中空ねじり試験結果と対応していると仮定して利用した。なお、第5章では三軸試験による液状化強度を $\varepsilon_{v(DA)}=3\%$ で規定したが、これを非排水条件においてせん断ひずみ $\gamma_{(DA)}$ に換算すると4.5%に相当する。したがって、ここでは三軸試験結果を中空ねじり試験による $\gamma_{(DA)}=4.5\%$ で規定した液状化強度曲線の補完に用いた。

凍結試料による液状化試験（図6.5.16 a）では、せん断応力比の大きな試料よりも、小さな

試料の方が液状化に対する抵抗率が低い傾向となっている。この傾向について考えられる要因は6.5.1にて述べた（HcEdo-B-F2試料に混入していた粘土塊）。したがって、江戸川砂B凍結試料の中空ねじり試験による液状化強度曲線としては、もう一方の凍結試料（HcEdo-B-F1）と、三軸試験（融解拘束圧98 kPaの凍結試料）の結果より設定した。また、図5.6.16 b)に示す応力履歴を受けた一部の再構成試料（HcEdo-B-R4）についても、同様の応力履歴を受けた再構成試料による三軸試験結果と比較して非常に大きな液状化に対する抵抗性を示している。この詳細な原因は明確ではないが、もう一方の中空試料（HcEdo-B-R2）と三軸試験結果は対応していることから、ここではHcEdo-B-R4試料は用いずに液状化強度曲線を設定した。

凍結試料と再構成試料の液状化強度曲線を重ねた図を図6.5.17に示すが、再構成試料は応力履歴を与えられることにより液状化強度が大幅に上昇している様子が確認できる。また、各試料の液状化強度曲線は、定義したせん断ひずみ両振幅 γ_{DA} の値と共に右側に立ち上がる傾向を示し、豊浦砂の中密な試料と似た傾向を呈する。

液状化強度 R_{LI5} を $\gamma_{DA}=4.5\%$ で規定した場合、応力履歴を受けた再構成試料の R_{LI5} は凍結試料と同等の値となっている。また、表6.5.4に示すように、応力履歴を受けた再構成試料の初期動的せん断剛性率 G_{d0} は凍結試料の値と同等になっている。再構成試料に応力履歴を与え、凍結試料の G_{d0} と同等の値となれば、再構成試料による実験でも凍結試料と同等の R_{LI5} が得られることを第5章にて述べたが、中空試験についても同様の傾向があるといえる。しかし、中空試験では凍結試料と再構成試料で異なるせん断応力比で実験を実施したことなどから、大ひずみに至るまで液状化挙動を再現できるかどうかは明確ではない。三軸試験による検討では、応力履歴を受けた再構成試料を用いても、洪積凍結試料の有するセメンテーションの影響までは再現できないことを示した。また、図6.5.14 a)では凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の繰返し載荷回数とせん断ひずみ両振幅の関係を示しているが、再構成試料は凍結試料と比較して、ひずみの増分が急に増える傾向にある。したがって、応力履歴により一時的な繰返し回数とひずみの大きさが一致しても、液状化中の挙動を再現することは難しいと考えられる。

表 6.5.4 江戸川砂 B 試料 (HcEdo-B) の液状化強度と初期動的せん断剛性率

試料名	Test No.	液状化抵抗 R_{L15}			G_{d0} (試料 No.)
		$\gamma_{(DA)} = 4.5\%$	$\gamma_{(DA)} = 10\%$	$\gamma_{(DA)} = 60\%$	
凍結試料	F1, F2	0.38	0.47	-	138.7 (F1)
					130.6 (F2)
再構成試料	R1, R3	0.16	0.18	0.29	88.6 (R3)
再構成試料 応力履歴	R2, R4	0.40	0.42	-	141.4 (R2)
					137.0 (R4)

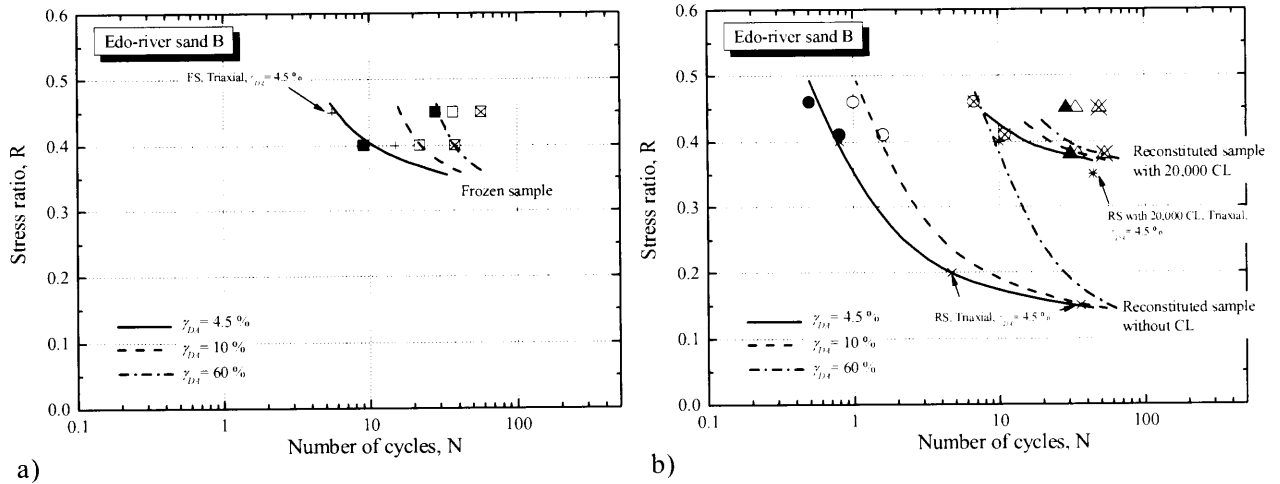


図6.5.16 江戸川砂B試料の液状化強度曲線

a) 凍結試料, b) 応力履歴のない再構成試料と応力履歴を受けた再構成試料

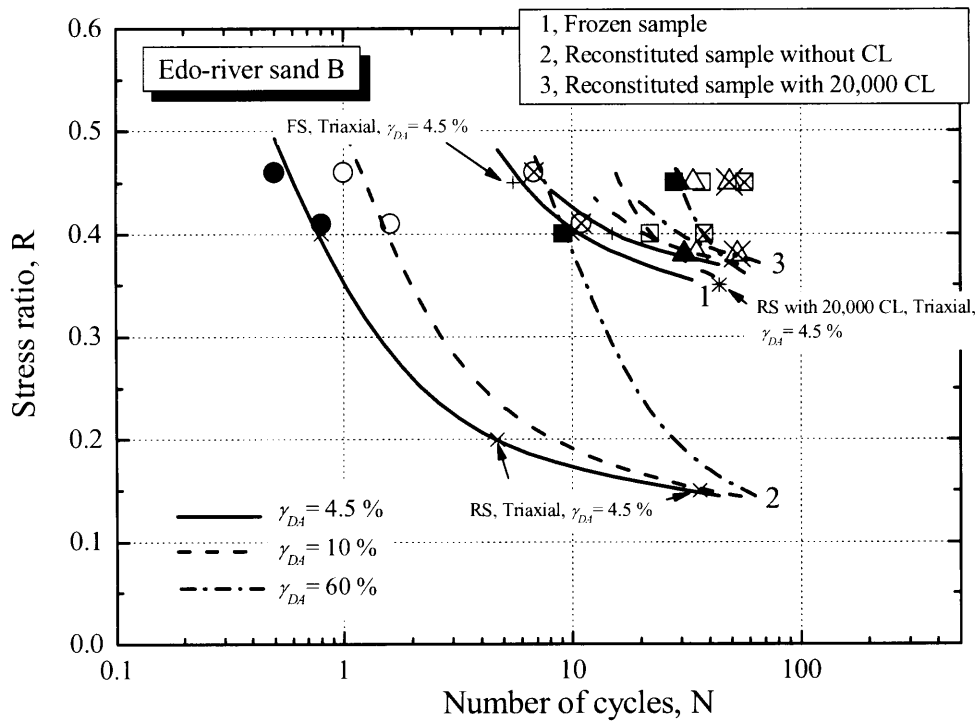


図6.5.17 江戸川砂B試料の液状化強度曲線

(2) 江戸川砂C試料

大ひずみ液状化試験による江戸川砂C試料の液状化強度曲線を図6.5.18に示す。また、凍結試料、各再構成試料の液状化強度 R_{L15} （所定のせん断ひずみ両振幅 γ_{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、液状化試験直前に計測した初期動的せん断剛性率 G_{d0} の結果を表6.5.5に示す。

江戸川砂C試料の中空ねじり試験による液状化強度曲線は、第5章の三軸試験結果と比較して、液状化に対する抵抗性は概ね良い対応を示す（図6.5.18 a）。しかし、図5.6.18 b) に示す応力履歴を受けた再構成試料については、同様の応力履歴を受けた再構成試料による三軸試験結果と比較して、液状化強度曲線は低い位置に分布する。この原因としては、繰返し载荷の回数は同じ20,000回であっても、試料の剛性に与えた影響が異なっている可能性が考えられる。また、江戸川砂C試料では、三軸に用いた試料と中空に用いた試料とでは、細粒分含有率が若干異なるため、液状化強度特性にも変化が生じた可能性がある。

凍結試料と再構成試料の液状化強度曲線を重ねた図を図6.5.19に示すが、再構成試料は応力履歴を与えられることにより液状化強度が若干上昇している様子が確認できる。また、各試料の液状化強度曲線は、定義したせん断ひずみ両振幅 γ_{DA} の値と共に右側に立ち上がる傾向を示すが、その程度は江戸川砂B試料と比較して小さい。しかし、応力履歴のない再構成試料と凍

結試料とを比較すると、後者の方が γ_{DA} の増加に伴う液状化強度 R_{L15} の増加は若干大きいといえる。

また、第5章において、液状化強度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、この傾向は中空ねじり試験においても同様である。図6.5.20に江戸川砂B, C試料、および6.4の豊浦砂の G_{d0} と所定の γ_{DA} に対応する R_{L15} との関係を示すが、 $\gamma_{DA}=4.5\%$ では、 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。また、ここでは第5章で示した三軸試験による結果も併記しているが、江戸川砂B, C試料共に、中空試験結果と対応している。

液状化初期拘束圧が同じ値（ $\sigma'_m = 100$ kPa）である豊浦砂と江戸川砂B試料については、 G_{d0} と R_{L15} の関係は概ね対応しているといえる。ここで、 $\sigma'_m = 160$ kPaである江戸川砂C試料の G_{d0} の拘束圧依存性を考慮して $\sigma'_m = 100$ kPaの値に正規化した値（ G_{dN} ）を図6.5.20の右側に示す。正規化に用いた式は第4章の式[4.2]であり、拘束圧依存性を表す n は、第4章で示した等方圧密試験結果より設定した。 G_{d0} の正規化により江戸川砂C試料の R_{L15} との関係は、正規化前（図6.5.20左側）よりも他の試料の結果に若干近づいたが、依然として拘束圧の影響は異なる。液状化強度と正規化されたせん断剛性率 G_{dN} の良い関係を示す報告は比較的多いが（e.g., 西ら, 1988）、本研究では拘束圧の影響について良い対応が得られなかった。

なお、 $\gamma_{DA}=10\%$ に対応する G_{d0} と R_{L15} の関係については、江戸川砂B試料の凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の関係が僅かに逆転しているが、概ね $\gamma_{DA}=4.5\%$ の場合と同様の傾向を呈する。 $\gamma_{DA}=60\%$ については、データ数が少ないことから、その傾向は明確でない。

表 6.5.5 江戸川砂 C 試料 (HcEdo-C) の液状化強度と初期動的せん断剛性率

試料名	Test No.	液状化抵抗 R_{L15}			G_{d0} (試料 No.)
		$\gamma_{DA}=4.5\%$	$\gamma_{DA}=10\%$	$\gamma_{DA}=60\%$	
凍結試料	F1, F2	0.33	0.34	0.36	253.3 (F2)
再構成試料	R1, R3	0.15	0.15	0.17	159.1 (R1)
再構成試料 応力履歴	R2, R4	0.21	0.21	0.22	212.5 (R4)

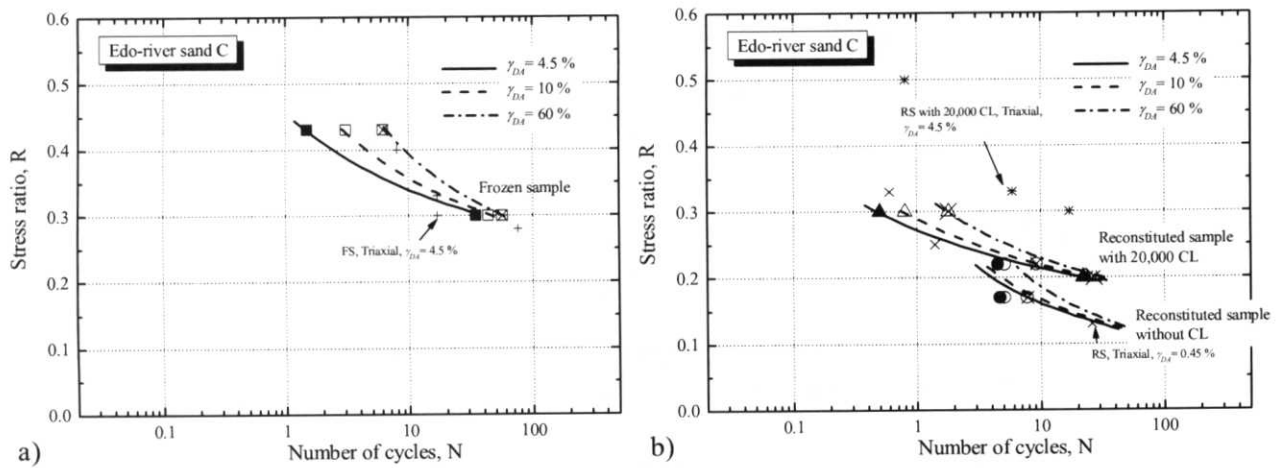


図6.5.18 江戸川砂B試料の液状化強度曲線

a) 凍結試料, b) 応力履歴のない再構成試料と応力履歴を受けた再構成試料

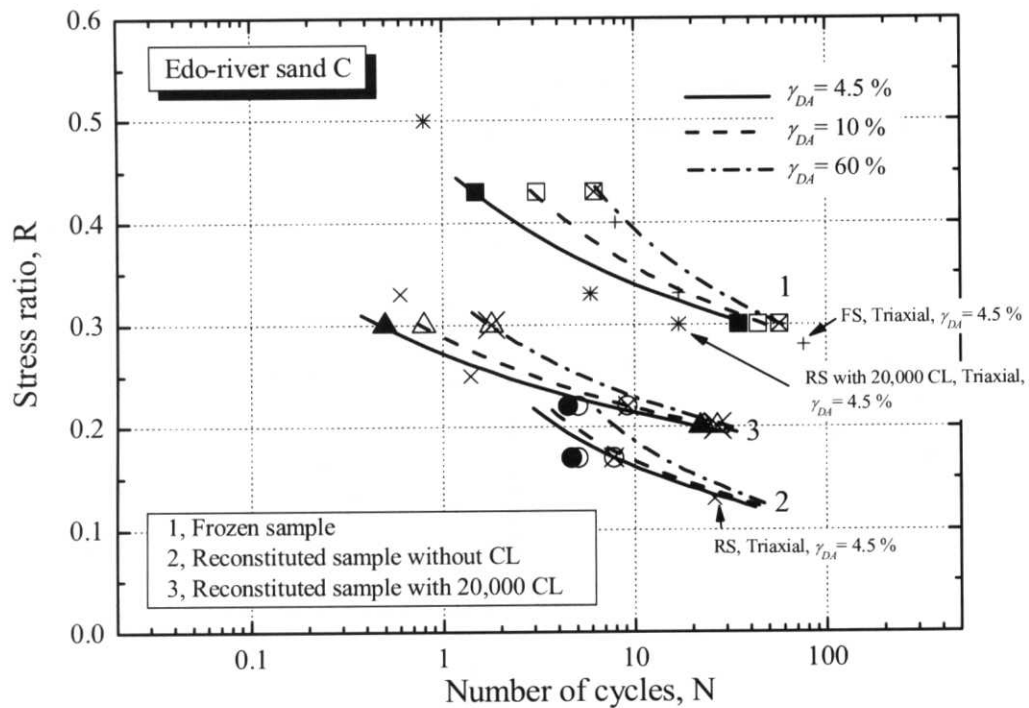


図6.5.19 江戸川砂C試料の液状化強度曲線

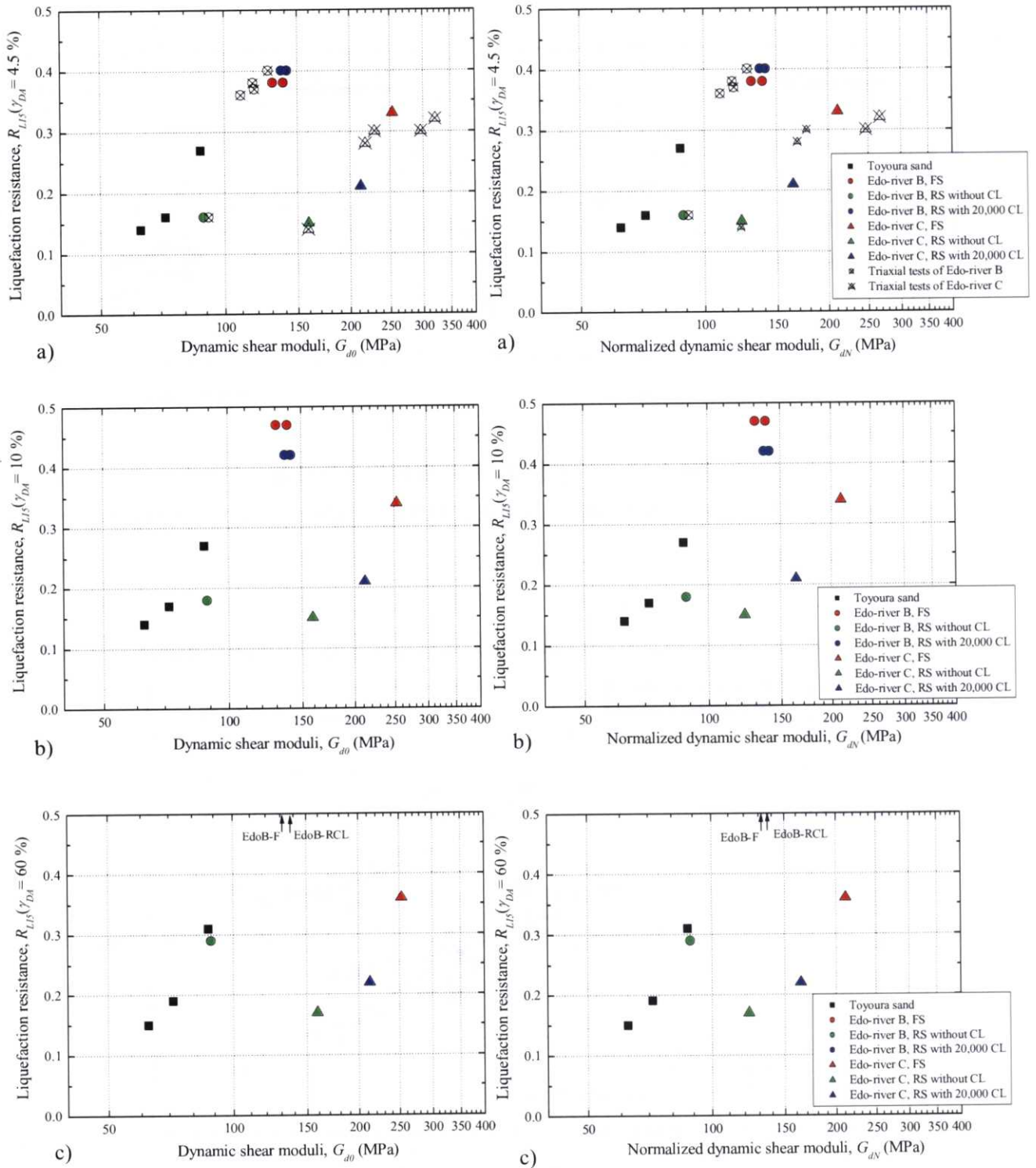


図6.5.20動的せん断剛性率（左： G_{d0} ，右： G_{dN} ）と液状化強度の関係

a) $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$, b) $\gamma_{(DA)} = 10\%$, c) $\gamma_{(DA)} = 60\%$

6.5.4 原位置採取試料の液状化限界ひずみ

原位置採取試料の液状化限界ひずみ γ_L^* は、6.4の豊浦砂と同様、液状化試験中の軸力が低下した時点の両せん断ひずみ振幅として定義している。

図6.5.21に各試料の相対密度 D_r と液状化限界ひずみ γ_L^* の関係を示す。なお、図中には豊浦砂による結果も併記している。豊浦砂については、 D_r と γ_L^* の間に一意的な関係が認められたが、原位置採取試料については、 D_r が同レベルであっても、凍結試料より再構成試料の方が γ_L^* の値は大きくなる傾向がある。これは第4章、第5章において詳細に示したように、圧密時および液状化時にその挙動に影響を与えていた年代効果（セメンテーション効果）の影響が作用しているものと推定され、液状化強度や微小変形特性と同様、 γ_L^* についても試料の密度だけでは説明できないことを示唆している。また、再構成試料について、繰返し载荷履歴を与えた場合と与えない場合とでは、後者の方がより大きな γ_L^* の値を示した。これは、繰返し载荷履歴による土粒子構造の安定化によるものと考えられる。しかし、繰返し载荷により若干 D_r が増加しているため、応力履歴と液状化限界ひずみ γ_L^* の関係については更に検討が必要である。

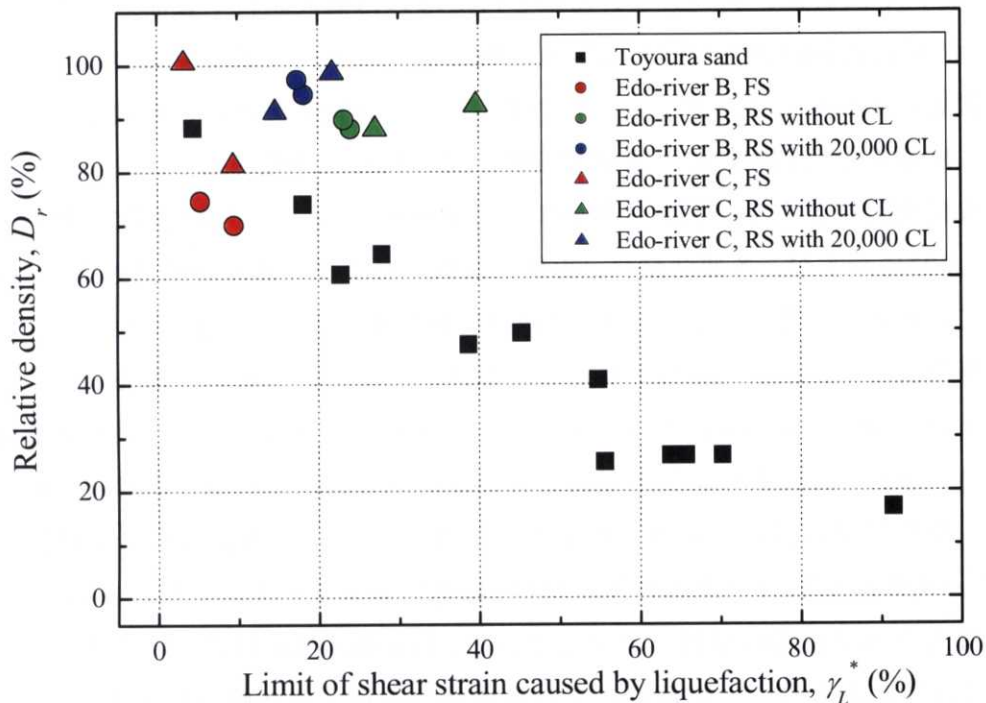


図6.5.21 江戸川砂B, C試料および豊浦砂の相対密度と液状化限界ひずみの関係

次に、液状化限界ひずみ γ_L^* について、液状化試験直前に計測した初期動的せん断剛性率 G_{d0} との関係を図6.5.22に示す。なお、豊浦砂と江戸川砂B試料の初期有効拘束圧は同じ値($\sigma'_m = 100$ kPa)であったが、江戸川砂A, C試料では、それぞれ $\sigma'_m = 60$ kPa, 160 kPaであった。したがって、図6.5.22では、 G_{d0} における拘束圧依存性を考慮するため、江戸川砂A, C試料の G_d を $\sigma'_m = 100$ kPa

の値に正規化した結果 (G_{dN}) を示す。

正規化された動的せん断剛性率 G_{dN} は、図6.5.21に示した相対密度よりは凍結試料と再構成試料における γ_L^* の値との対応は良いといえる。しかし、江戸川砂B試料の場合、凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の G_{dN} と $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ で定義した液状化強度 R_{L15} はほとんど同じであるにもかかわらず、 γ_L^* は後者の方が二倍～三倍程度も大きい。この傾向を年代効果の観点から考察すると、凍結試料では土粒子構造の安定とセメンテーションの効果が、再構成試料については応力履歴による土粒子構造の安定化が液状化に対する抵抗性を発揮していると考えられるが、同じ初期せん断剛性率が得られたとしても、セメンテーションの効果を有する試料は一様に変形する領域が比較的小さい傾向があるといえる。更に、江戸川砂B、C試料の凍結試料同士の比較では、江戸川砂C試料の方が小さな γ_L^* を示した。4.6では、一軸圧縮試験結果より、江戸川砂C試料の方がB試料よりも大きなセメンテーション効果を有していることを述べたが、その傾向は γ_L^* にも反映されているといえる。また、6.5.3では各試料の G_{dN} と $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ で規定した液状化強度 R_{L15} との相関が良いことを示したが、これは考慮している変形レベルが比較的小さいため、凍結試料と再構成試料の年代効果の違いが反映されなかったものと考えられる。しかし、図6.5.22において、セメンテーション効果を持たない再構成試料や豊浦砂の動的せん断剛性率 G_{dN} と γ_L^* の関係は比較的良好に対応している。現時点ではデータ数が少ないため一概には言えないが、沖積層のようなセメンテーション効果の小さい試料であれば、液状化限界ひずみ γ_L^* と初期動的せん断剛性率との間には一意的な関係が得られる可能性がある。

また、液状化限界ひずみ γ_L^* は液状化強度との関係も良いことが感覚的にも理解できる。比較結果を図6.5.23に示すが、各凍結試料、再構成試料、および豊浦砂の結果も含め、 R_{L15} と γ_L^* は良く対応しているといえる。ここで、江戸川砂B試料に着目すると、液状化強度を $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ で規定した場合よりも、 $\gamma_{(DA)} = 10\%$ で規定した場合の方が、 γ_L^* と良い相関を示している。これについても上述と同様、 γ_L^* の値はセメンテーションの効果が影響するが、液状化強度については規定するひずみレベルにより、年代効果の違いが反映されない可能性が考えられる。

最後に、原位置採取試料の応力比振幅と γ_L^* に至るまでの繰返し回数との関係について、図6.5.24に江戸川砂B試料、図6.5.25に江戸川砂C試料の結果を示す。また、各図には従来の $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ で規定した液状化強度曲線も追記している。江戸川砂B試料については、 $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ と γ_L^* の曲線との差は比較的大きく、豊浦砂における中密な試料と似た傾向を示す。また、江戸川砂C再構成試料では、 $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ の液状化曲線と γ_L^* の曲線の差は比較的小さいことから、液状化の発生と共に限界ひずみまで比較的早く到達するものと考えられる。同様に、江戸川砂C凍結試料についても $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ の液状化曲線と γ_L^* の曲線の差は小さいが、凍結試料については $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$ 付近で液状化限界ひずみに達するため、両者の差は小さくなったといえる。

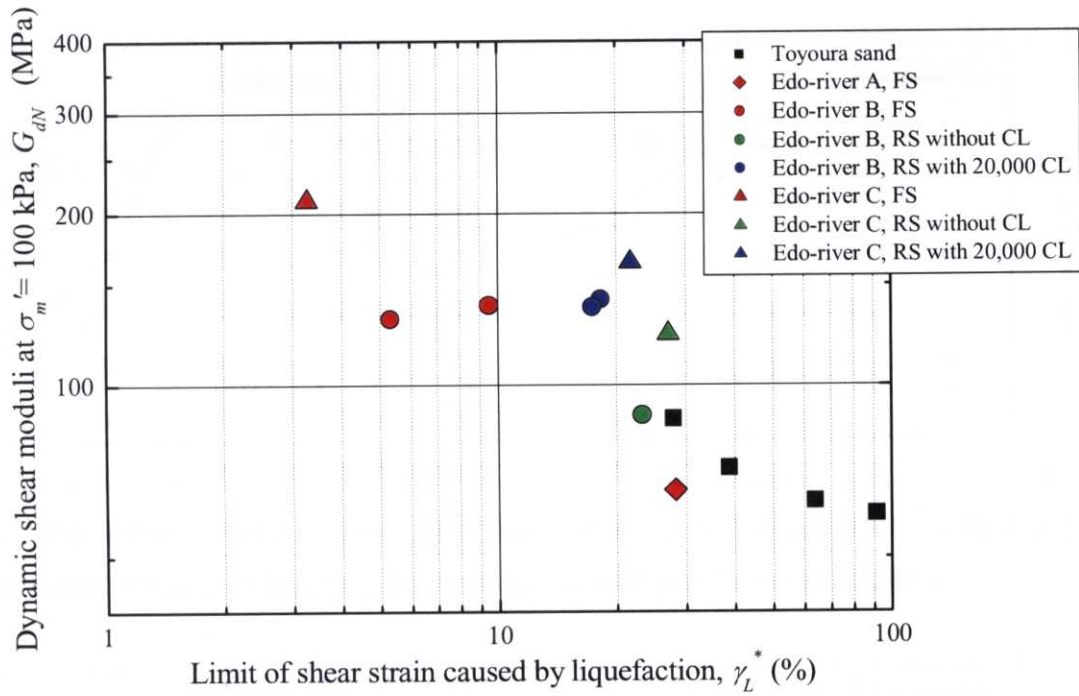


図6.5.22 拘束圧の影響を補正した動的せん断剛性率と液状化限界ひずみの関係

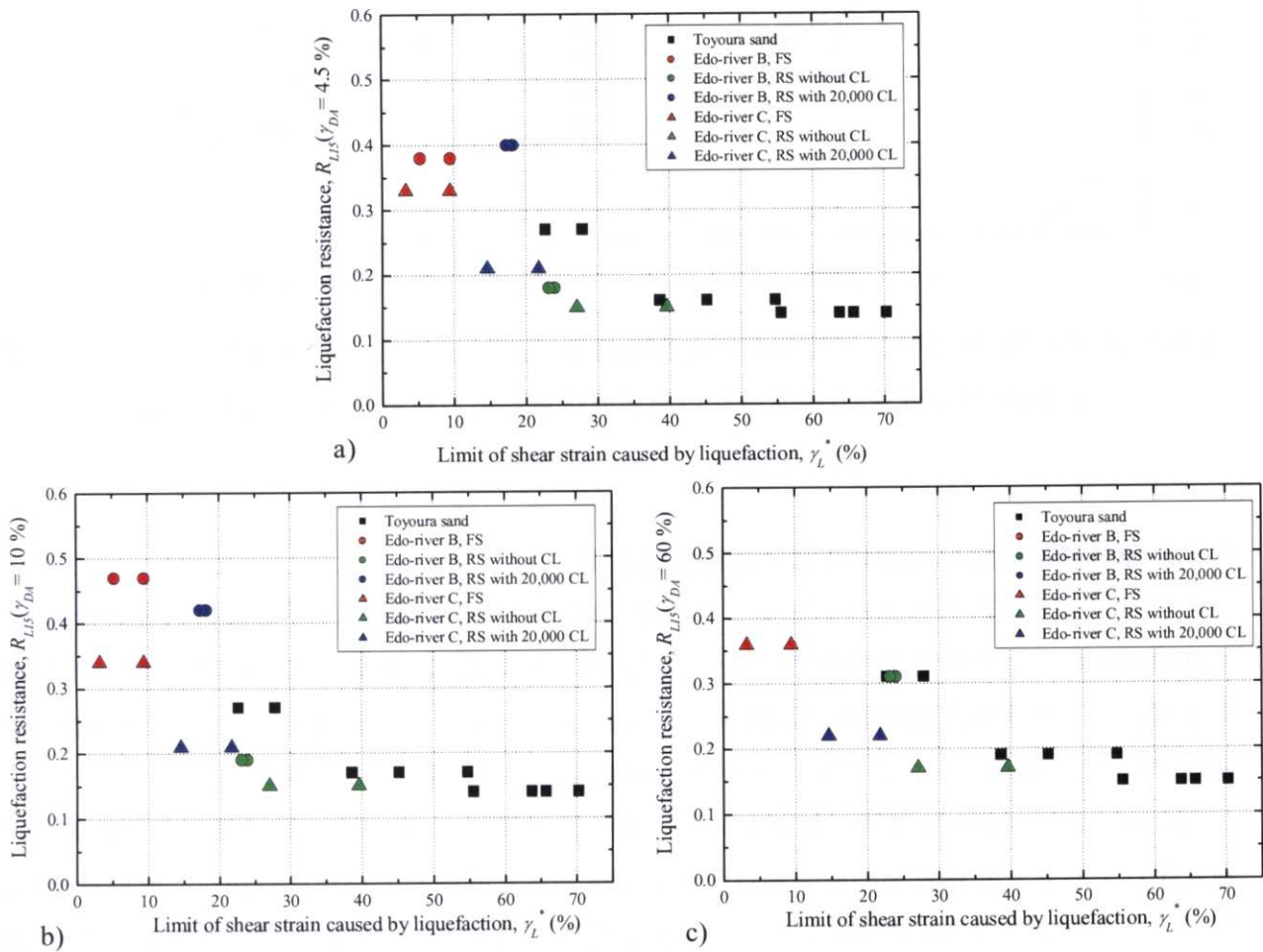


図6.5.23 限界液状化ひずみと液状化強度の関係 a) $\gamma_{(DA)} = 4.5\%$, b) $\gamma_{(DA)} = 10\%$, c) $\gamma_{(DA)} = 60\%$

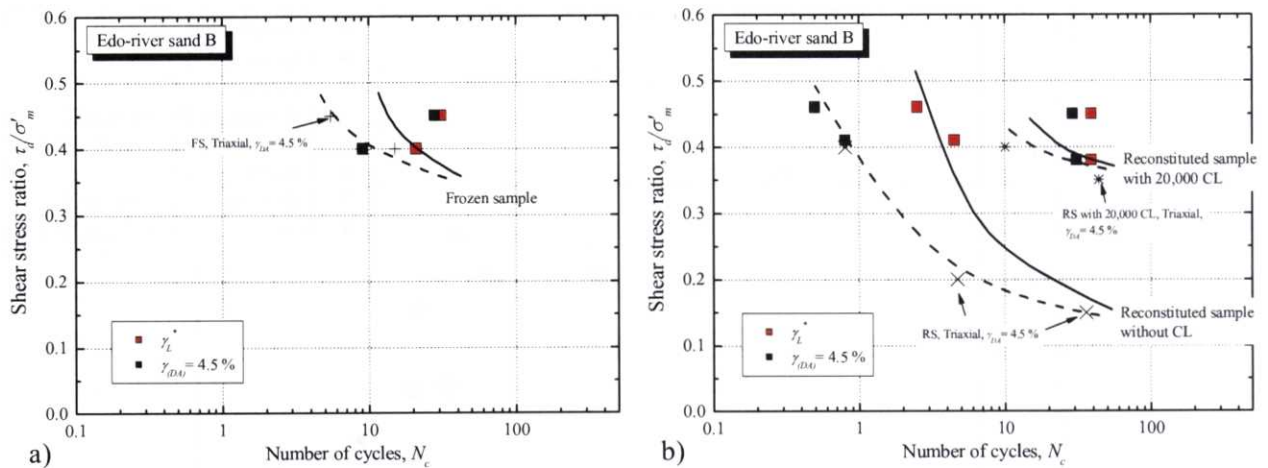


図6.5.24 江戸川砂B試料における液状化強度曲線 ($\gamma_{(DA)} = 4.5\%$) と液状化限界ひずみの関係

a) 凍結試料, b) 応力履歴のない再構成試料と応力履歴を受けた再構成試料

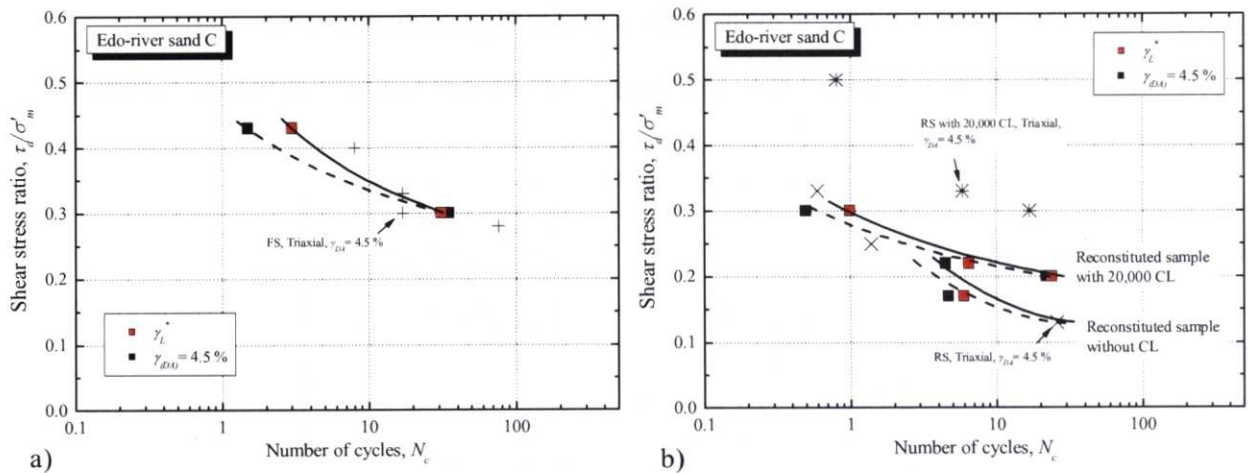


図6.5.25 江戸川砂C試料における液状化強度曲線 ($\gamma_{(DA)} = 4.5\%$) と液状化限界ひずみの関係

a) 凍結試料, b) 応力履歴のない再構成試料と応力履歴を受けた再構成試料

6.5.5 原位置採取試料の液状化による剛性低下率

6.4では、液状化限界ひずみ γ_L^* に達したときの応力-ひずみ関係より、豊浦砂の液状化後のせん断剛性率 G_1 とせん断応力回復時の剛性 G_2 （各ねじり方向の平均値）を求めた。ここでは同様の手法によって求めた原位置採取試料の G_1 、 G_2 を示す。また、液状化前に計測した動的せん断剛性率 G_{d0} との関係より、液状化によるせん断剛性率の低下率 G_1/G_{d0} を求めた。

表6.5.6に江戸川砂B、C試料の液状化による剛性低下率 G_1/G_{d0} を示す。豊浦砂による結果では、液状化によるせん断剛性率の低下率は試料の密度と良く対応していた。しかし、原位置採取試料では、凍結試料の方が再構成試料よりも低い密度であるにもかかわらず、液状化による剛性の低下は小さいことが確認された。また、凍結試料の剛性の低下率は、1/500~1/200程度となり、

江戸川砂B試料の方がC試料よりも剛性は低下した。一方、再構成試料については、試料の違いによらず、1/1700~ 1/1200程度の範囲に分布する。HcEdo-B-R3試料では他の再構成試料より低い低下率となったが、それ以外では応力履歴の有無による差は認められなかった。

全体的に豊浦砂の場合（1/15,000~ 1/6,000）と比較すると、原位置採取試料の液状化に伴う剛性の低下はかなり小さいと考えられる。これは、原位置採取試料では全体的に密度が高いことに加え、粒度分布や供試体の微視的構造の影響によるものと推定される。また、再構成試料の応力履歴の有無に関しては明確な傾向は認められなかったが、凍結試料との差は非常に大きい。この結果より、土粒子構造の安定性よりも、土粒子間に発達するセメンテーション効果を持つ試料の方が、液状化に伴う剛性の低下が小さいことを示唆している。

液状化による剛性の低下率は、液状化限界ひずみ γ_L^* に達したときの応力-ひずみ曲線よりもとめたものであるため、 γ_L^* との対応も良いものと考えられる。図6.5.26に豊浦砂の結果も含めた両者の関係を示すが、非常に良い相関が得られているといえる。また、図6.5.27には G_2 と γ_L^* の関係を示すが、 γ_L^* が大きくなるほど G_2 の値は小さくなる傾向が認められる。

表 6.5.6 凍結試料の液状化による剛性低下率

No.	試料	D_r (%)	G_1 (kPa)	G_2 (kPa)	G_{d0} (MPa)	G_1/G_{d0}
HcEdo-B-F1	凍結試料	70.0	263.4	1217.0	138.7	1.9×10^{-3}
HcEdo-B-F2	凍結試料	74.5	498.5	2635.5	130.6	3.8×10^{-3}
HcEdo-B-R2	再構成+応力履歴	94.5	82.9	922.4	141.4	5.9×10^{-4}
HcEdo-B-R3	再構成試料	89.7	119.6	620.7	88.6	1.4×10^{-3}
HcEdo-B-R4	再構成+応力履歴	97.2	105.6	1056.0	137.0	7.7×10^{-4}
HcEdo-C-F1	凍結試料	81.3	905.8	1378.2	-	-
HcEdo-C-F2	凍結試料	100.5	1478.6	3416.8	253.3	5.8×10^{-3}
HcEdo-C-R1	再構成試料	88.0	113.7	319.2	159.1	7.1×10^{-4}
HcEdo-C-R4	再構成+応力履歴	98.5	138.1	322.7	212.5	6.5×10^{-4}

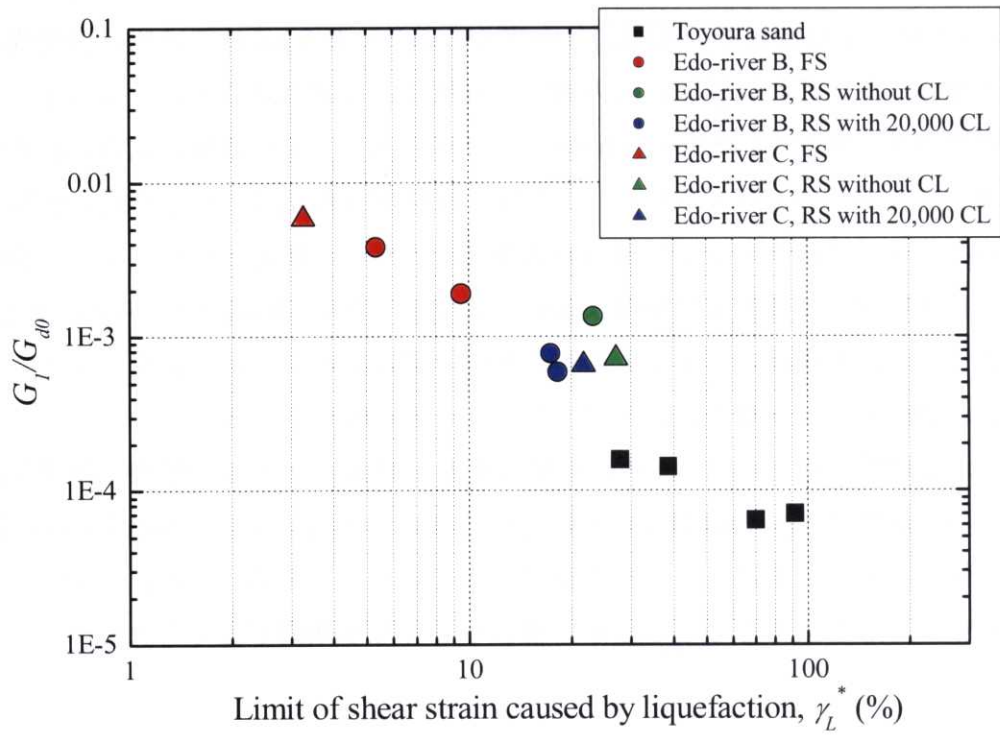


図6.5.26 液状化による剛性低下率と液状化限界ひずみの関係

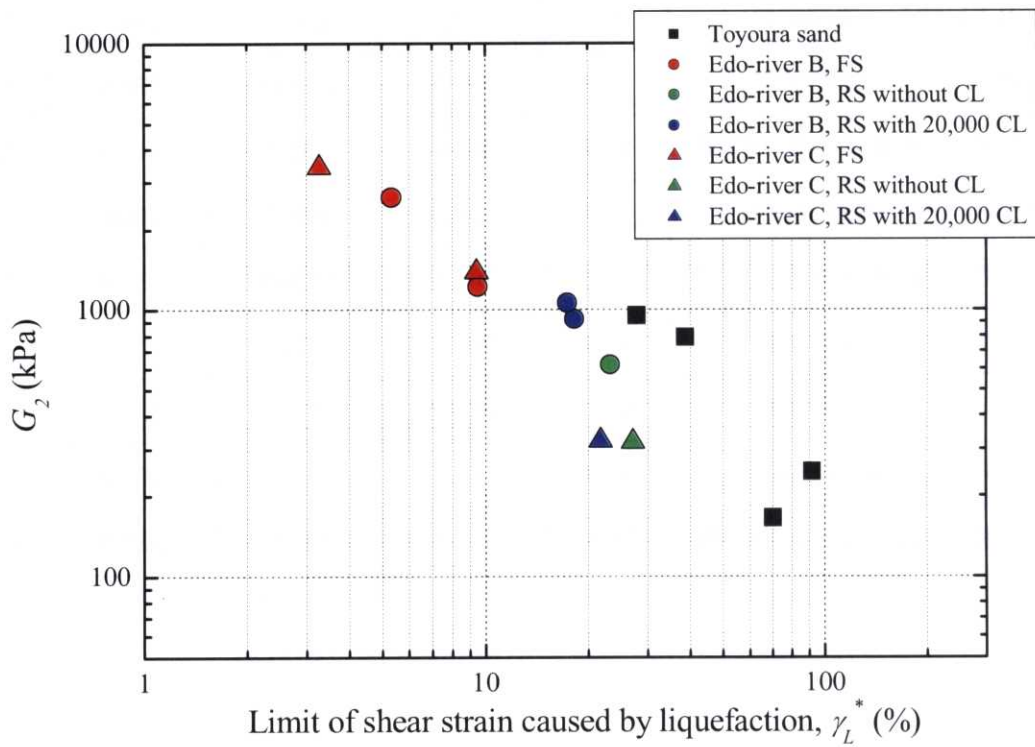


図6.5.27 液状化限界ひずみとせん断応力回復時の剛性との関係

6.6 まとめ

本章では、せん断ひずみ両振幅を100%程度まで計測できるよう開発された大ひずみ中型中空ねじり試験機を用い、豊浦砂と原位置採取試料を用いて基本的な実験を実施した。また、各試料の大ひずみ液状化特性と微小変形特性について検討した。

以下、本章の実験結果を基に、主な留意事項を記す。

6.6.1 大ひずみ液状化試験について

せん断ひずみ両振幅が100%に至るような中空ねじり試験の場合、メンブレン張力の補正は非常に重要となる。しかし、メンブレンの弾性係数を用いた従来の理論値による補正では、実際の挙動を表現できないことから、本研究では、せん断抵抗のない水試料によるメンブレン張力の実測値を用いて、メンブレン張力の補正を実施した。

豊浦砂と原位置採取試料による大ひずみ液状化試験により、従来の液状化要素試験では不可能であった数十～100%のせん断ひずみ両振幅の計測を適切に実施することができた。結果として、せん断ひずみ両振幅を数十%の値で規定した液状化強度曲線を求めることができた。

豊浦砂については、液状化強度は密度と共に増加した。本研究では、供試体の密度・応力比振幅を変化させて実験を実施したが、いずれのケースにおいてもせん断ひずみ両振幅は最終的に100%に達した。また、緩い供試体では液状化の発生と共に、せん断ひずみが数%から数十%まで急激に大きくなる傾向が認められた。

原位置採取試料について、凍結採取試料は再構成試料と比較して大きな液状化強度を発揮した。また、再構成試料は応力履歴を与えることにより液状化強度の増加が認められた。この傾向は第5章の三軸試験結果でも確認されている。凍結試料の場合、再構成試料と比較して大変形時に供試体が大きく歪む傾向があった。なお、原位置採取試料についても豊浦砂と同様、せん断ひずみ両振幅は100%に達し、途中でひずみが収束することはなかった。

実験を実施したすべての試料の共通事項として、大変形時における局所化の発達が挙げられる。局所変形は、密度や試料の種類により発生するタイミングが異なるが、*cyclic mobility*によってせん断変形と共にせん断応力が増加し、その後せん断応力が除荷されたときにしわが発生し、その繰返しにより局所化が発達する。多くの試料に認められた変形形態としては、供試体上端部のキャップとの境界における局所変形であり、一部の試料では供試体内部にも大きなせん断層が複数発達して、最終的には要素試験の範疇を超える変形形態を呈した。

大ひずみレベルにおけるこのような供試体の変形から、単に所定のひずみ振幅で規定した液状化強度曲線を液状化大変形を考慮した設計に用いることは適切でない可能性がある。

6.6.2 大ひずみ液状化試験による液状化限界ひずみ γ_L^* について

本研究による大ひずみ液状化試験では、試料の違いによらず最終的にせん断ひずみ両振幅は100%に達し、途中でひずみが収束することはなかった。しかし、液状化により供試体が一樣に変形する領域は、試料の密度や種類により大きく異なる。液状化試験は軸変位固定条件で実施したが、本研究では液状化中の試料のダイレイタンスー特性に着目し、液状化中に軸力が急激に低下した時点を供試体が局所化に至った時点と仮定して、そのときのせん断ひずみ両振幅を液状化限界ひずみ γ_L^* と定義した。この定義による液状化限界ひずみは、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、任意の地震応力振幅において振動中に地盤が一樣に変形する領域で生じ得る最大せん断ひずみと考えることができる。

空中落下法によって作成した豊浦砂供試体の場合、液状化限界ひずみは相対密度と非常に良い相関が得られ、過去の地震で被災した地域における側方流動の測量値や、室内試験結果をもとに外挿された経験式とも対応することが確認できた。また、液状化限界ひずみはせん断応力比によらず、供試体の密度に依存することが実験により示された。これを踏まえ、液状化限界ひずみに達するまでの繰返し载荷回数と応力比振幅の関係より、液状化限界ひずみに関して従来の液状化強度曲線と同様の関係を見出すことができた。この液状化限界ひずみ曲線を用いることで、設計地震力により液状化地盤が限界ひずみに達するか否かを判定することができると考えられる。また、液状化の判定を任意のひずみ振幅で規定した液状化強度により実施する場合、液状化限界ひずみ曲線が液状化強度曲線よりも内側に分布するような地盤では、一樣に地盤が変形するような液状化は発生しないと考えることができよう。

6.6.3 動的せん断剛性率と大ひずみ液状化特性の関係について

第5章において、液状化試験直前に計測した初期動的せん断剛性率は、三軸試験による液状化強度($\gamma_{DA}=4.5\%$ で規定)と良く対応していることを示した。本章でも、初期動的せん断剛性率と中空試験による液状化強度とを比較したが、両者の関係は概ね一意的であることが確認できた。また、凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料、および応力履歴のない再構成試料の相対密度は同レベルの値であったが、各試料の液状化限界ひずみはそれぞれ異なる値を示した。この傾向は、液状化による変形挙動は相対密度では規定できないことを示唆している。

一方、江戸川砂C試料の初期せん断剛性率と液状化限界ひずみの関係は、定性的には対応しており、全体的に相対密度よりもせん断剛性率で整理した方が、対応は良いといえる。しかし、江戸川砂B試料の液状化限界ひずみについて、繰返しせん断履歴を受けて凍結試料と同等の動的せん断剛性率と従来の定義による液状化強度を示した再構成試料と凍結試料の値を比較すると、再構成試料の方が二倍～三倍程度大きな液状化限界ひずみの値を示した。このことから、液状化前に計測した動的せん断剛性率は、比較的小さいひずみレベルでの液状化強度特性を反

映するが、変形が大きくなると試料の種類や年代効果によっては適切に説明できないと考えられる。

6.6.4 年代効果がひずみ液状化特性に及ぼす影響について

第5章で示した三軸試験では、年代効果（土粒子構造の安定化・セメンテーション）が液状化前または液状化過程における微小変形特性に影響を及ぼすことを示した。また、洪積試料の場合、応力履歴を与えることで再構成試料に凍結試料と同等の剛性を与えても、液状化中の挙動までは表現できないことを示した。この傾向は本章の中空ねじり試験結果にも現れている。江戸川砂B再構成試料（洪積試料）では、応力履歴を与えられることにより凍結試料と同等の動的せん断剛性率が得られ、またせん断ひずみ両振幅を4.5%で規定した場合の液状化強度は、凍結試料と同程度の値となった。しかし、繰返し载荷に伴うせん断ひずみの増加傾向は凍結試料と異なる傾向を示し、液状化限界ひずみは凍結試料の二～三倍の値となっている。

この傾向を年代効果の観点から考察すると、凍結試料では土粒子構造の安定とセメンテーションの効果が、再構成試料については応力履歴による土粒子構造の安定化が液状化に対する抵抗性を発揮していると考えられるが、同じ初期せん断剛性が得られたとしてもセメンテーションの効果を有する試料の方が、一様に変形する領域が小さくなる傾向があるといえる。また、動的せん断剛性率と液状化強度との相関が良いことについては、液状化強度を規定する変形レベルが比較的小さいため、凍結試料と再構成試料の微視的構造の違いが反映されなかったものと考えられる。

最後に、本章では凍結試料と再構成試料において、液状化限界ひずみに達したときの *cyclic mobility* における応力-ひずみ関係より、原点からせん断応力が回復するまでの勾配を用いて液状化後のせん断剛性率を求めた。また、この値を液状化前に計測した動的せん断剛性率の値と比較することで、液状化による剛性低下率を求めた。その結果、再構成試料における応力履歴の有無については有意な傾向は認められなかったが、再構成試料の方が凍結試料よりも液状化に伴って剛性が大きく低下する傾向がある。また、液状化による剛性の低下率は、液状化限界ひずみと非常に良い関係があり、液状化による大変形挙動を予測する上でセメンテーションの考慮は非常に重要であることを示唆している。

《参考文献》

- 1) Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A. and Chameau, J. L. (1988): Undrained monotonic and cyclic strength of sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **114** (10), 1089-1109.
- 2) Been, K. and Jefferies, M. G. (1985): A state parameter for sand, *Geotechnique*, **35** (2), 99-112.
- 3) Casagrande, A. (1936): Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills, *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*, 13-32.
- 4) Castro, G. (1969): Liquefaction of sands, *No.81 in Harvard Soil Mechanics Series*. Pierce Hall, Cambridge, Massachusetts.
- 5) Elgamal, A. M., Zeghal, M. And Parra, E. (1995): Identification and modeling of earthquake response, 1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.3, 1369-1406.
- 6) Kokusho, T. (2000): Mechanism for water film generation and lateral flow in liquefied sand layer, *Soils and Foundations*, **40**(5), 99-111.
- 7) Koseki, J., Yoshida, T. and Sato, T. (2005): Liquefaction properties of Toyoura sand in cyclic torsional shear tests under low confining stress, *Soils and Foundations*, **45** (5), 103-113.
- 8) Meyerhof, G. G. (1957): Discussion, *Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.3, 110.
- 9) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, M. A. (1958): On the yielding of soils, *Geotechnique*, **8**(1), 22-53.
- 10) Seed, H. B. (1979): Liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, *Jour. Geotech. Eng. Dic.*, ASCE, Vol.105, No.GT2, 201-255.
- 11) Shamoto, Y., Zhang, J.-M. and Goto, S. (1997): Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sand, *Soils and Foundations*, **38**(2), 71-80.
- 12) Shamoto, Y., Zhang, J.-M. and Tokimatsu, K. (1998): New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation, *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.17, 427-437.
- 13) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. (1983): Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content, *Soils and Foundations*, **23** (4), 56-74.
- 14) Vaid, Y. P. (1995): Liquefaction and postliquefaction behavior of sand, *Jour. Geotechnical Eng.*, ASCE, Vol.121, No.GE2, 163-173.
- 15) Verdugo, R. L. (1992): Characterization of sandy soil behavior under large deformation, PhD thesis, University of Tokyo.
- 16) Yasuda, S., Yoshida, N., Masuda, T., Nagase, H., Mine, K. and Kiku, H. (1995): Stress-strain

relationships of liquefied sands, *Earthquake Geotechnical Engineering*, Ishihara (ed.), Balkema, Rotterdam, 811-816.

- 17) 後藤茂, 馬場幸吉, 森誠二, 西尾伸也 (1992): 動的載荷により間隙水圧の上昇した砂の変形特性, 第27回土質工学研究発表会講演集, 871-872.
- 18) 後藤茂, 馬場幸吉, 森誠二, 西尾伸也 (1993): 動的載荷により間隙水圧の上昇した砂質土の変形特性, 第28回土質工学研究発表会講演集, 931-932.
- 19) 佐藤剛司, 清田隆, 古関潤一 (2007): 大ひずみ中空ねじりせん断試験装置の開発, 第42回地盤工学研究発表会論文集, CD-ROM.
- 20) 地盤工学会 (2004): 液状化対策工, 実務シリーズ 18
- 21) 時松孝次 (1997): 耐震設計とN値, 基礎工, 61-66.
- 22) 西好一, 小峰秀雄, 飯島健 (1988): 拘束圧と中ひずみせん断履歴が液状化強度と初期せん断剛性率との関係に及ぼす影響, 第23回土質工学研究発表会講演集, 687-688.
- 23) 社団法人日本建築学会 (2001): 建築基礎構造設計指針
- 24) 社団法人日本道路協会 (2002): 道路橋示方書 V. 耐震設計編
- 25) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫 (1999): 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638, III-49, 71-89.
- 26) 山下聡, 土岐祥介 (1991): 繰返し三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比較, 第26回土質工学研究発表会講演集, 725-728.
- 27) 吉田望, 安田進, 濱田正則ほか (1994): 液状化の程度が応力-ひずみ関係に与える影響と地盤の側方流動, 第29回土質工学研究発表会講演集, 851-854.
- 28) 吉嶺充俊 (1996): 単調載荷による飽和砂の非排水流動変形に関する研究, 博士論文, 東京大学大学院.
- 29) 吉見吉昭, 福武毅芳 (2005): 地盤液状化の物理と評価・対策技術, 技報堂出版.