

5.4.3 応力履歴のない再構成試料の液状化過程における微小変形特性

液状化中の微小変形特性は、凍結試料では利根川砂と江戸川砂で若干異なる傾向を呈していたが、応力履歴のない再構成試料では、試料の違いによる有意な差は認められない。図 5.4.7 に利根川砂、図 5.4.8 に江戸川砂 B 試料、および図 5.4.9, 図 5.4.10 に江戸川砂 C 試料の再構成試料における液状化中の微小変形特性を示す。ヤング率は鉛直有効応力 σ_v' と、せん断剛性率については応力関数 $(\sigma_v'\sigma_h')^{0.5}$ との関係を示したが、凍結試料の場合と同様、動的せん断剛性率 G_d については、応力関数 $(\sigma_v'\sigma_h')^{0.5}$ と良い相関関係を示している。また、再構成試料のヤング率・せん断剛性率共に、液状化中の値は直前の等方圧密過程において計測した値と概ね同等である。これは、再構成試料はもともと年代効果を有していない試料であるため、土粒子間の安定性は年代効果を有する凍結試料と比較して非常に低く、圧密時と液状化時との間に顕著な差は現れなかったものと考えられる。なお、応力履歴のない再構成試料について、利根川砂試料（沖積層）と江戸川砂 B, C 試料（洪積層）の結果が似通った傾向にあることは、再構成試料には洪積試料といえども年代効果の影響がないこと、および粒度分布が似通っていること（2.2 参照）を考慮すれば説明が可能である。

液状化中の動的せん断剛性率 G_d の低下について、再構成試料と凍結試料の結果を比較したものを図 5.4.11~ 図 5.4.16 に示す。なお、これらの図では比較を容易に行うため、普通軸で表している。利根川砂試料については、液状化前の G_d の値は再構成試料の方が低い値であったが、液状化開始後比較的早い段階で凍結試料の G_d が再構成試料の値に近づく傾向がある（図 5.4.11）。これは、液状化によって利根川砂凍結試料の年代効果が失われ、 G_d が再構成試料の値に近づいてくる過程を示しており、年代効果の喪失が比較的早い段階で生じているものと推定できる。なお、利根川砂の場合、凍結試料の液状化中の G_d の値が再構成試料の値に接近したとき、すなわち年代効果が失われたと考えられる時点での軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)}$ は、約 1%前後であった。また、図 5.4.12 に示すように、利根川砂試料の液状化中の G_d を G_{d0} で正規化した値で整理すると、再構成試料の G_d の値は凍結試料と比較すると全体的に大きな値で推移している。これは前述と同様、利根川砂凍結試料では液状化初期段階で剛性が急に低下したことを示唆している。

江戸川砂 B, C 試料の G_d の低下傾向（図 5.4.13, 図 5.4.15）については、凍結試料の値は液状化とともに再構成試料の値に次第に漸近する傾向を示す。これは利根川砂の結果と異なるものであり、洪積層である江戸川砂 B, C 試料では年代効果の喪失が緩やかに生じていることを示唆している。なお、江戸川砂 B, C 試料砂の場合、凍結試料の液状化中の G_d の値が再構成試料の値に接近した時点での軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)}$ は、約 3~4%であった。また、 G_d を G_{d0} で正規化した結果を図 5.4.14, 図 5.4.16 に示すが、江戸川砂 B, C 試料共に、再構成試料と凍結試料の値は同等の値となっている。

前章 4.5 において述べたように、年代効果のタイプの違いは土の堆積年代によって異なるものと考えられる。すなわち、沖積層では土粒子構造の安定性が、洪積層では土粒子構造の安定

性にセメンテーション効果が加わるものと考えられる。この仮定を考慮すると、年代効果としてセメンテーション効果を有する洪積層（江戸川砂 B, C 試料）では、その効果の喪失は比較的緩く、土粒子の安定性しか持たない沖積試料（利根川砂試料）では、液状化初期段階においてその効果が失われるものと考えられる。しかし、洪積層（江戸川砂 B, C 試料）の年代効果が失われたと考えられる時点での軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)}$ は約 3~4%であり、感覚的にセメンテーション効果がそれほど大きなひずみ領域まで保持されているとは考え難い。したがって、洪積試料については、ひずみの増加に伴うセメンテーションの破壊が生じた後にも、土粒子構造の安定性が保持される要因（例えば Pettijohn et al.(1972)の報告にある、粒子の磨耗等による面接関係の形成や凹凸関係、縫合関係など）が存在するものと考えられる。

なお、各試料の応力履歴のない再構成試料の液状化中の G_d 、および G_d/G_{d0} をまとめたものを図 5.4.17、図 5.4.18 に示す。応力履歴のない再構成試料は年代効果がほとんどないことから、試料の違いによる明確な差は認められず、特に正規化された値による比較では、各試料とも非常に似通った傾向を示す。

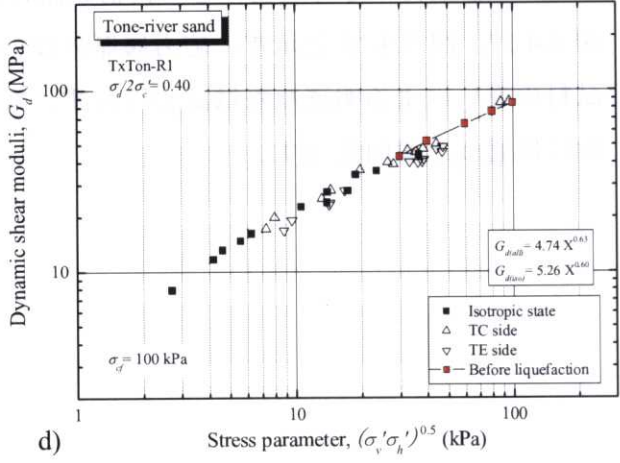
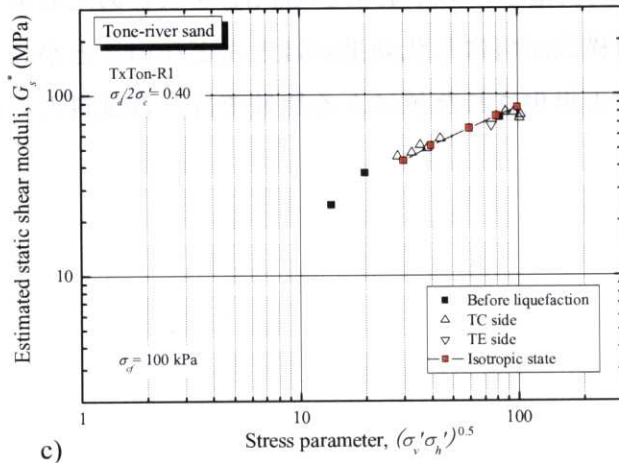
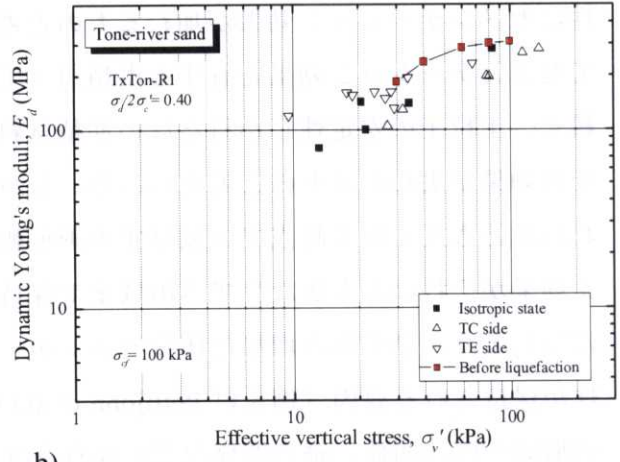
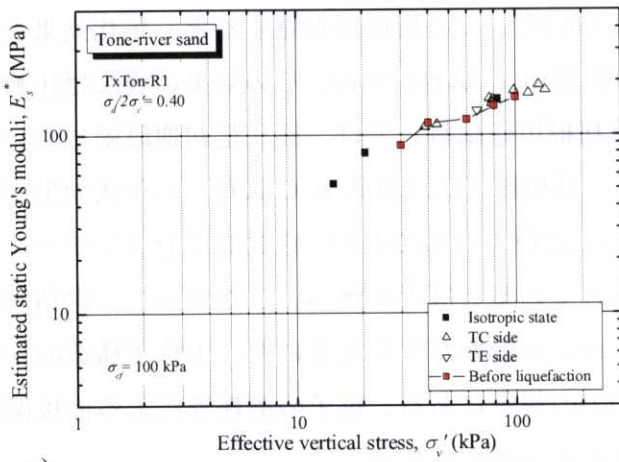


図 5.4.7 応力履歴のない利根川砂再構成試料 (TxTon-R1) の液状化過程における a) E_s^* , b) E_d , c) G_s^* , d) G_d

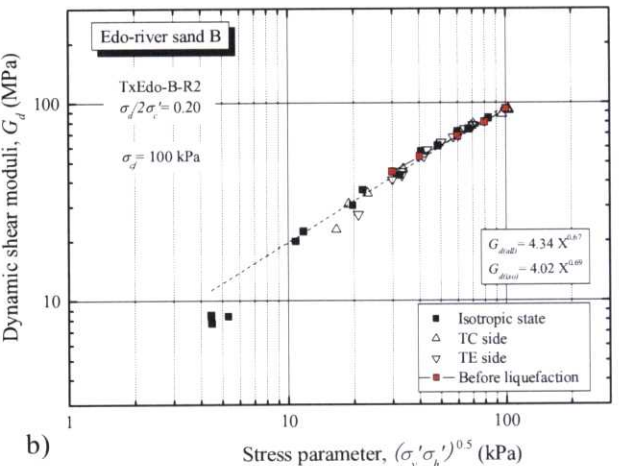
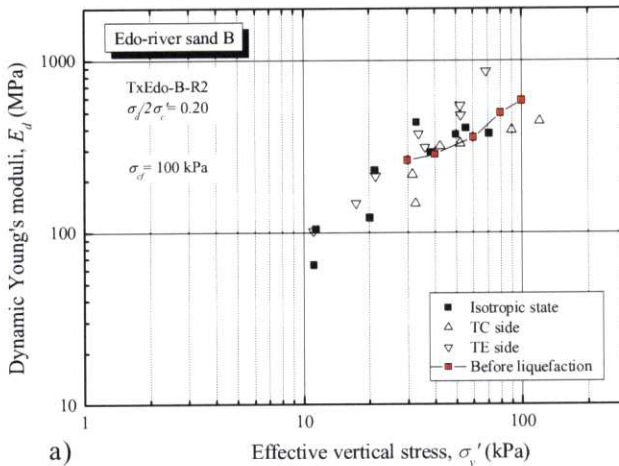


図 5.4.8 応力履歴のない江戸川砂 B 再構成試料 (TxEdo-B-R2) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

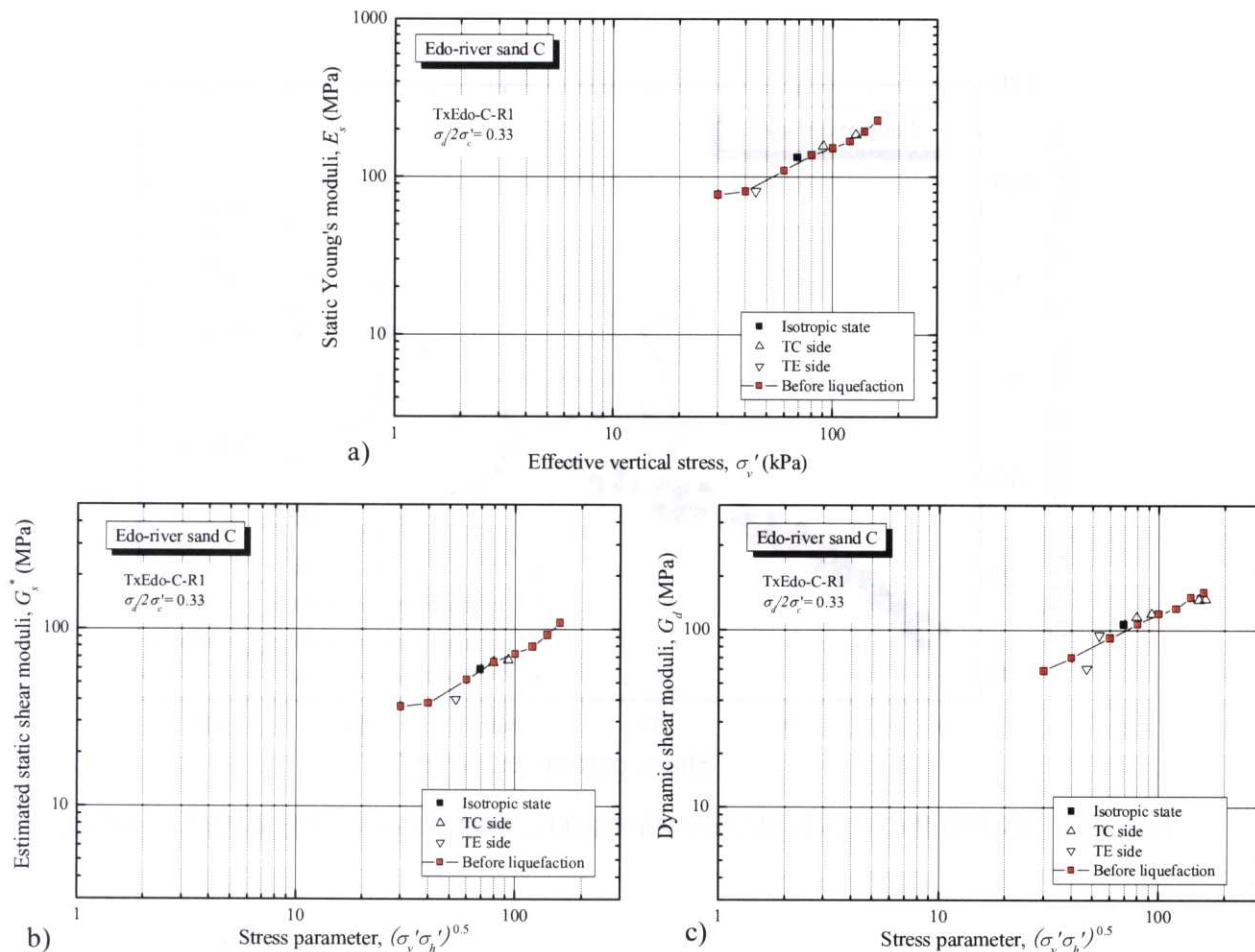


図 5.4.9 応力履歴のない江戸川砂 C 再構成試料 (TxEdo-C-R1) の液状化過程における a) E_s^* , b) G_s^* , c) G_d

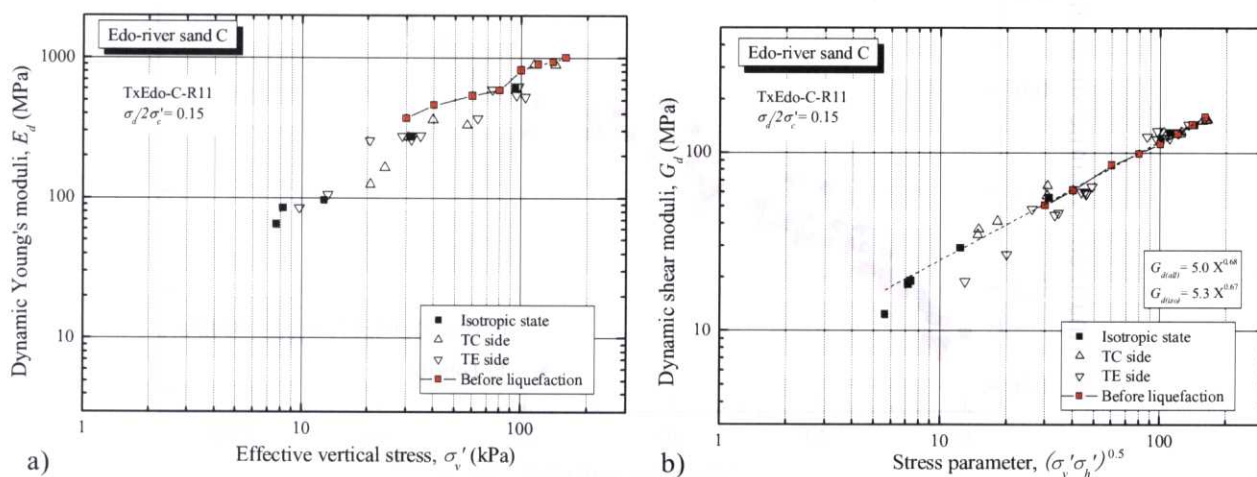


図 5.4.10 応力履歴のない江戸川砂 C 再構成試料 (TxEdo-C-R11) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

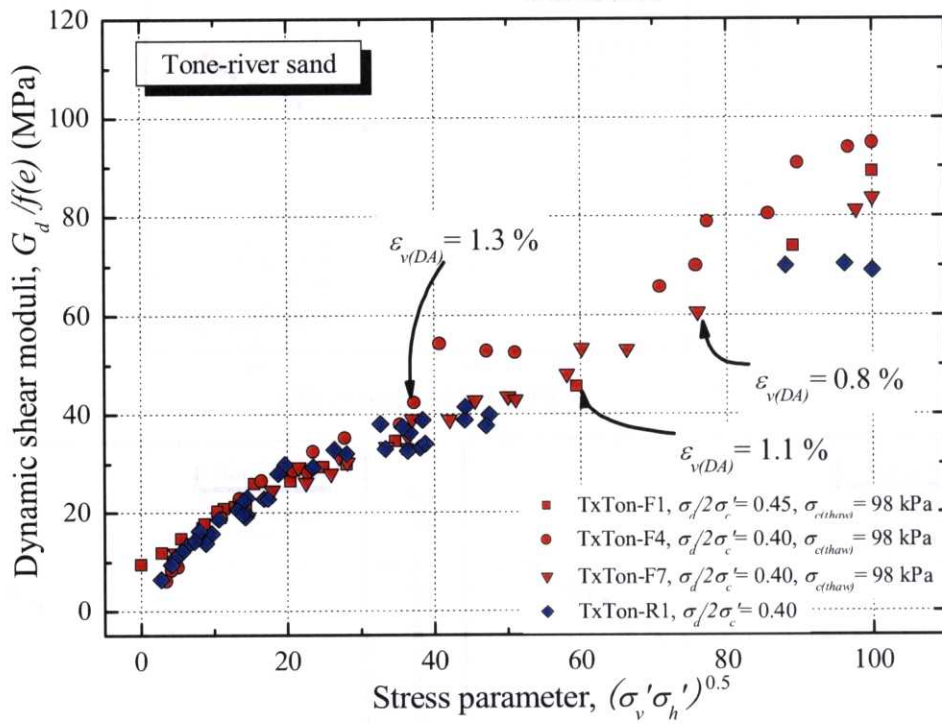


図 5.4.11 応力履歴のない利根川砂再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d

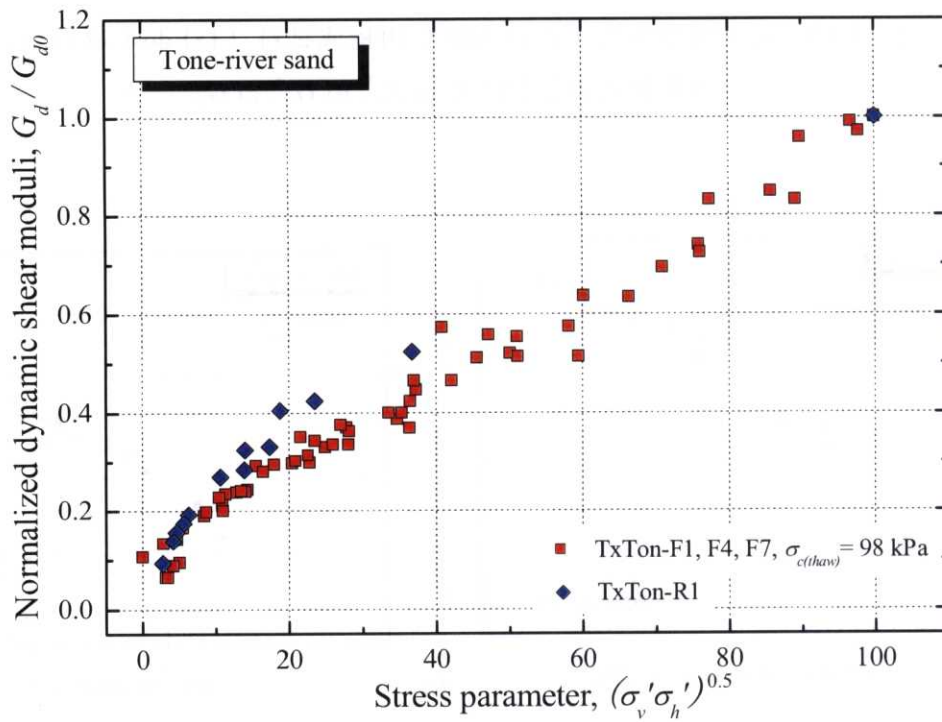


図 5.4.12 応力履歴のない利根川砂再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

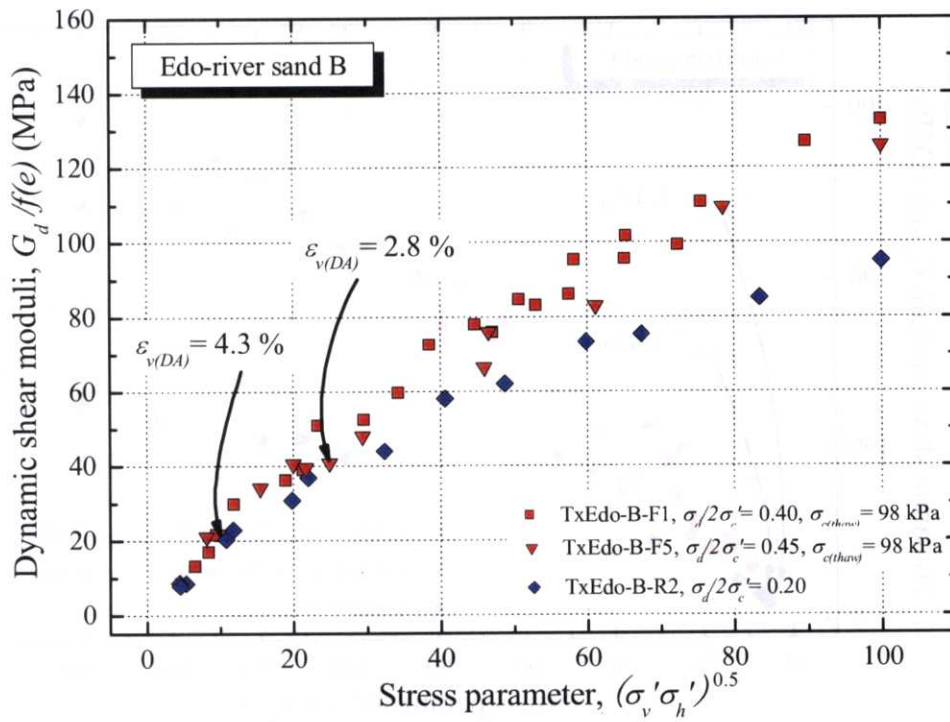


図 5.4.13 応力履歴のない江戸川砂 B 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d

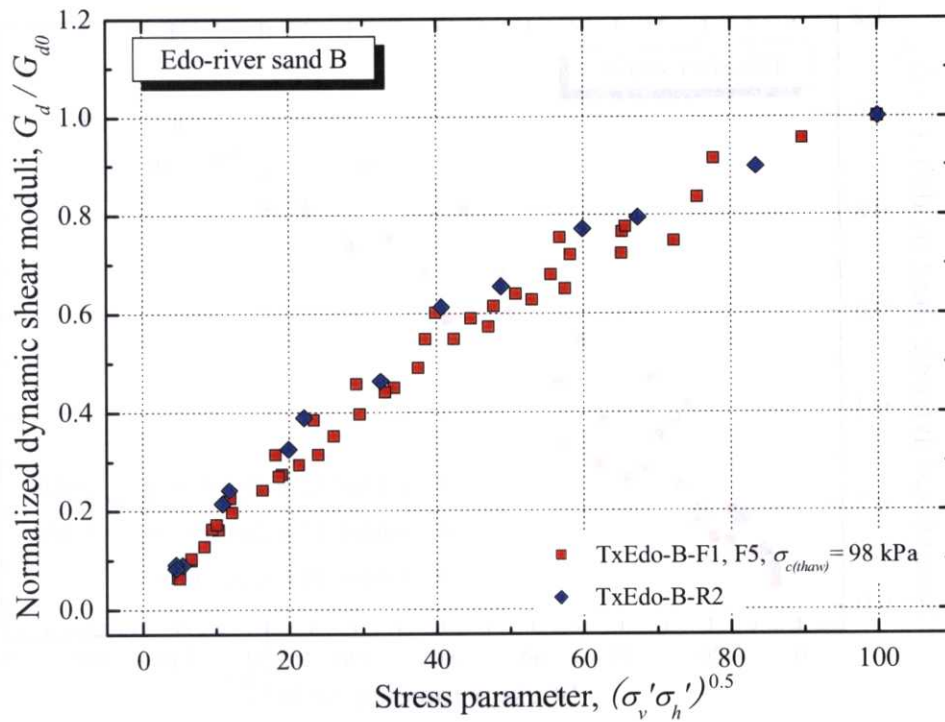


図 5.4.14 応力履歴のない江戸川砂 B 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

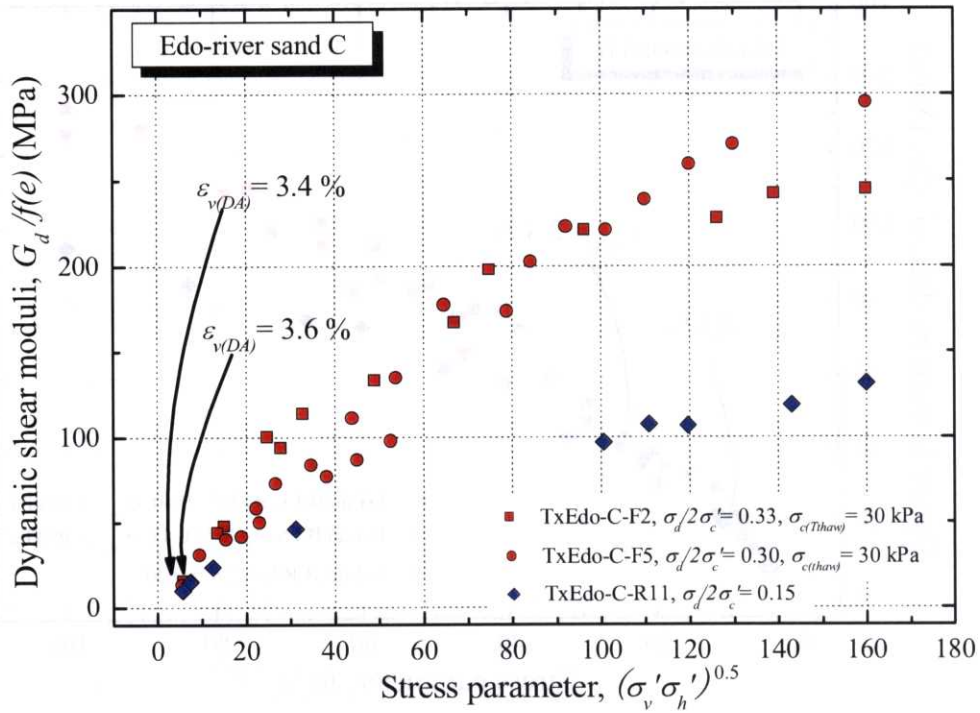


図 5.4.15 応力履歴のない江戸川砂 C 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d

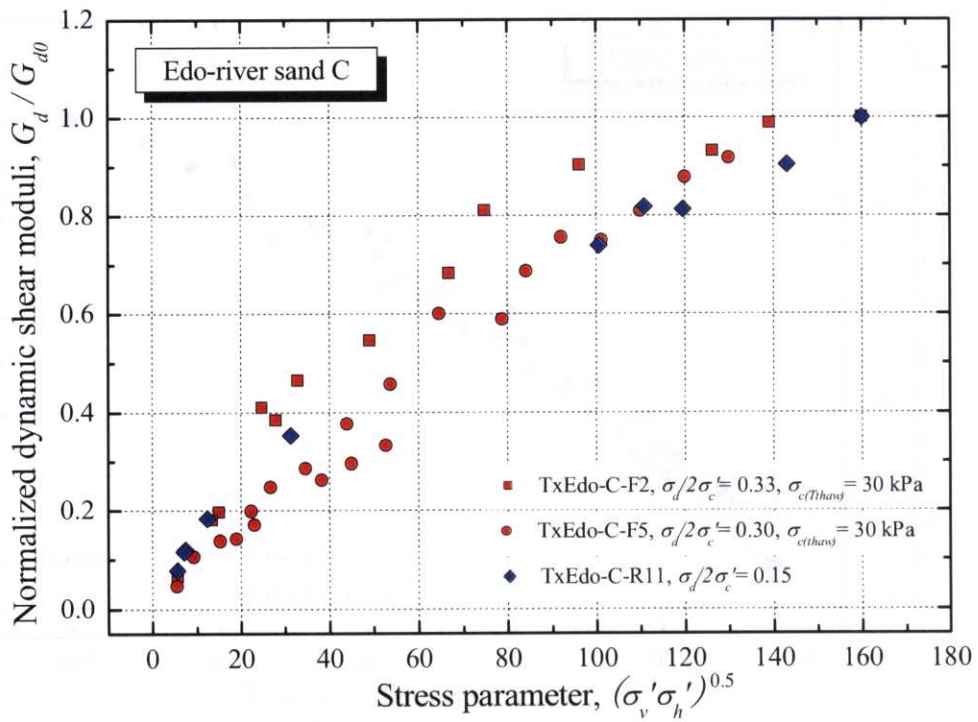


図 5.4.16 応力履歴のない江戸川砂 C 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

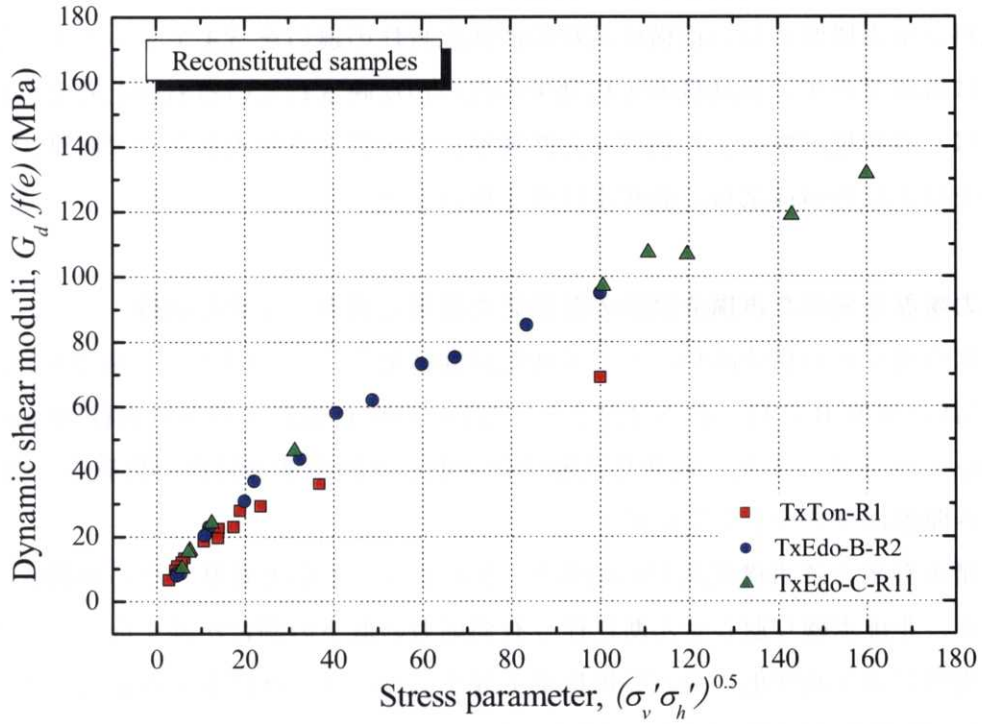


図 5.4.17 応力履歴のない再構成試料の液状化過程における G_d

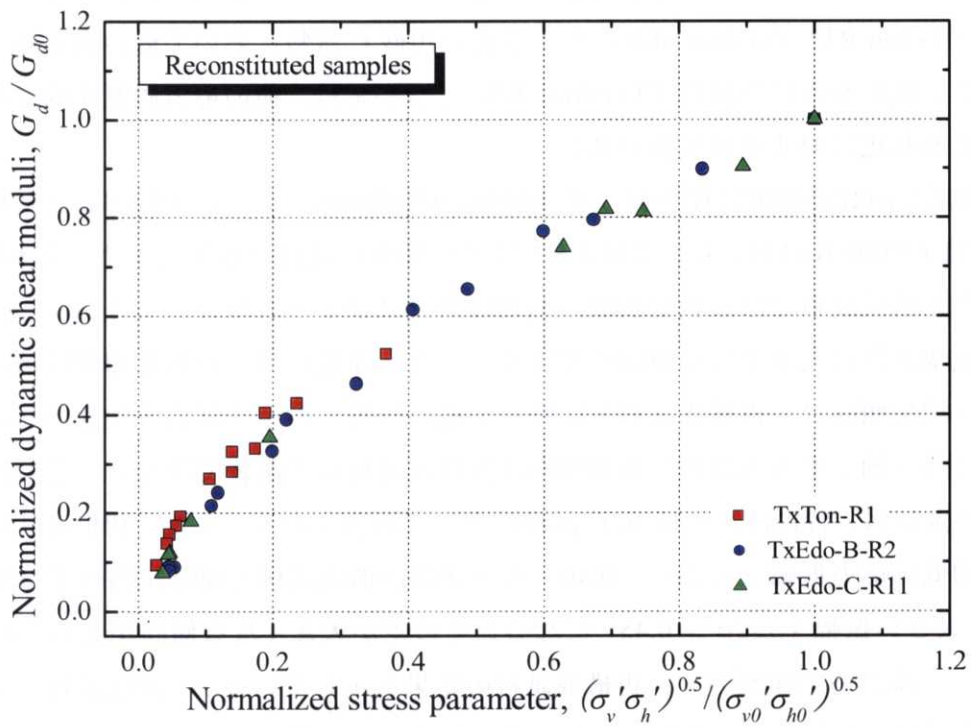


図 5.4.18 応力履歴のない再構成試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

5.5 応力履歴を受けた再構成試料の液状化特性

凍結試料と応力履歴のない再構成試料の液状化特性の違いを 5.4 で示したが、その要因は密度だけでは説明できず、各試料の年代効果の違いが反映されているものと考えられる。

ここでは、液状化試験の前に初期せん断履歴、および等方排水クリープ履歴により擬似的な年代効果を与えた再構成試料の液状化特性を検討した。

5.5.1 応力履歴を受けた再構成試料の有効応力経路と応力-ひずみ曲線

応力履歴を受けた再構成試料による液状化試験結果として、図 5.5.1, 図 5.5.2 に利根川砂、図 5.5.3 に江戸川砂 B 試料、および図 5.5.4 に江戸川砂 C 試料の有効応力経路($q-p'$)、応力-ひずみ曲線($q-\varepsilon_v$)を示す。また、液状化試験中に計測した微小変形特性の位置を、有効応力経路、応力ひずみ曲線にプロットしている。

応力履歴を有する各再構成試料の結果と、5.4 で示した応力履歴のない再構成試料の結果と比較すると、非排水繰返しせん断に伴う有効応力の低下の割合が鈍くなっていることがわかる。応力履歴により液状化に対する抵抗が上昇することは、既に多くの研究により明らかになっているが、本研究でも同様の傾向が得られているといえよう。また、5.3 の凍結試料の $q-p'$, $q-\varepsilon_v$ 関係と比較すると、軸ひずみの増加傾向が、伸張側だけでなく圧縮側にも広がっている点について異なっているといえる。一方、利根川砂試料と江戸川砂 C 試料において等方クリープを与えた試料 (TxTon-R12, TxEdo-C-R4)、および江戸川砂 C 試料において低い拘束圧で繰返し履歴を与え、その後圧密された試料 (TxEdo-C-R5) については、他の応力履歴を受けた再構成試料と比較して液状化に対する抵抗性は低い。

また、繰返し回数の増加に伴う軸ひずみ振幅の増加傾向について、図 5.5.5 に利根川砂試料、図 5.5.6 に江戸川砂 B 試料、および図 5.5.7 に江戸川砂 C 試料の結果を示す。全体的に、応力履歴を受けた再構成試料では液状化試験の初期段階ではひずみの増分は小さいが、ある時点から軸ひずみ振幅が急に大きくなる傾向を呈する。一方、凍結試料の液状化初期段階における軸ひずみ振幅の増加傾向は、再構成試料と比較して概ね同等、もしくは若干大きいものの、繰返し回数増加に伴う軸ひずみの急激な増加傾向は再構成試料ほど顕著ではない。この再構成試料と凍結試料の違いは、特に江戸川砂 B, C 試料において顕著である。また、利根川砂試料については、比較的低い応力振幅 ($\sigma_d/2\sigma'_c = 0.40$) のときは再構成試料と凍結試料の差は小さいが (図 5.5.5 a)), 大きい振幅 ($\sigma_d/2\sigma'_c = 0.45$) になるとその差が大きくなる傾向が認められる (図 5.5.5 b))。なお、一部に応力履歴のない再構成試料の結果も示しているが、凍結試料や応力履歴を受けた再構成試料と比較して、繰返し回数に伴うひずみの増加は明らかに大きい。

各試料の繰返し回数を軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)} = 3\%$ に達したときの繰返し回数で正規化した値と、軸ひずみ両振幅の関係を図 5.5.8 に示す。結果より、江戸川砂 B, C 試料の凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の差は、利根川砂試料よりも非常に大きくなっている。このように、

試料によって異なる傾向を示した原因としては、堆積年代の違いに起因する年代効果の影響が考えられる。前章 4.5 において、年代効果については土粒子構造の安定化と、土粒子間のセメンテーションの発達と考えられることを示したが、利根川砂（沖積層）については、凍結試料であってもセメンテーションの発達は弱いものと考えられることから、繰返し载荷履歴により土粒子構造の安定化が成された再構成試料により液状化中の挙動を再現できたものと考えられる。一方、土粒子構造の安定化だけでなく、セメンテーションの発達が見込まれる江戸川砂 B, C 試料（洪積層）については、その液状化挙動を再構成試料において再現するためには、繰返し载荷による土粒子構造の安定化だけでなく、土粒子間に作用するセメンテーションの影響も考慮する必要があるものと考えられる。

また、このような堆積年代の違いによる液状化挙動の違いは、繰返し载荷に伴う間隙水圧の上昇傾向にも現れている。図 5.5.9~ 図 5.5.11 に、各試料の繰返し回数を軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)} = 3\%$ に達したときの繰返し回数で正規化した値と、間隙水圧比 u/σ'_c の関係を示すが、沖積層である利根川砂については凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の傾向は似通っているが、洪積層である江戸川砂 B, C 試料については、凍結試料と再構成試料は全く異なる傾向を示している。具体的には、セメンテーション効果を有する江戸川砂 B, C 試料では、土粒子構造の安定性による年代効果しか持たない再構成試料よりも間隙水圧は上昇し易い傾向にあるといえる。しかし、5.4 でも述べたように、洪積層では有効応力の低下に伴う剛性低下は比較的生じにくい傾向があることから、液状化に対する抵抗性は大きくなるものと考えられる。

参考までに、様々な試料の液状化時における間隙水圧の上昇傾向を検討した Tatsuoka et al. (1980) の実験結果を図 5.5.12 に示す。図 5.5.12 では、比較的液状化強度の高い試料 (Site G) と、液状化強度の低い試料 (Toyoura sand) の繰返し回数と間隙水圧比 u/σ'_c の関係を示しているが、これらの関係は江戸川砂 B, C 試料の凍結試料と再構成試料の傾向とよく対応しているといえる。

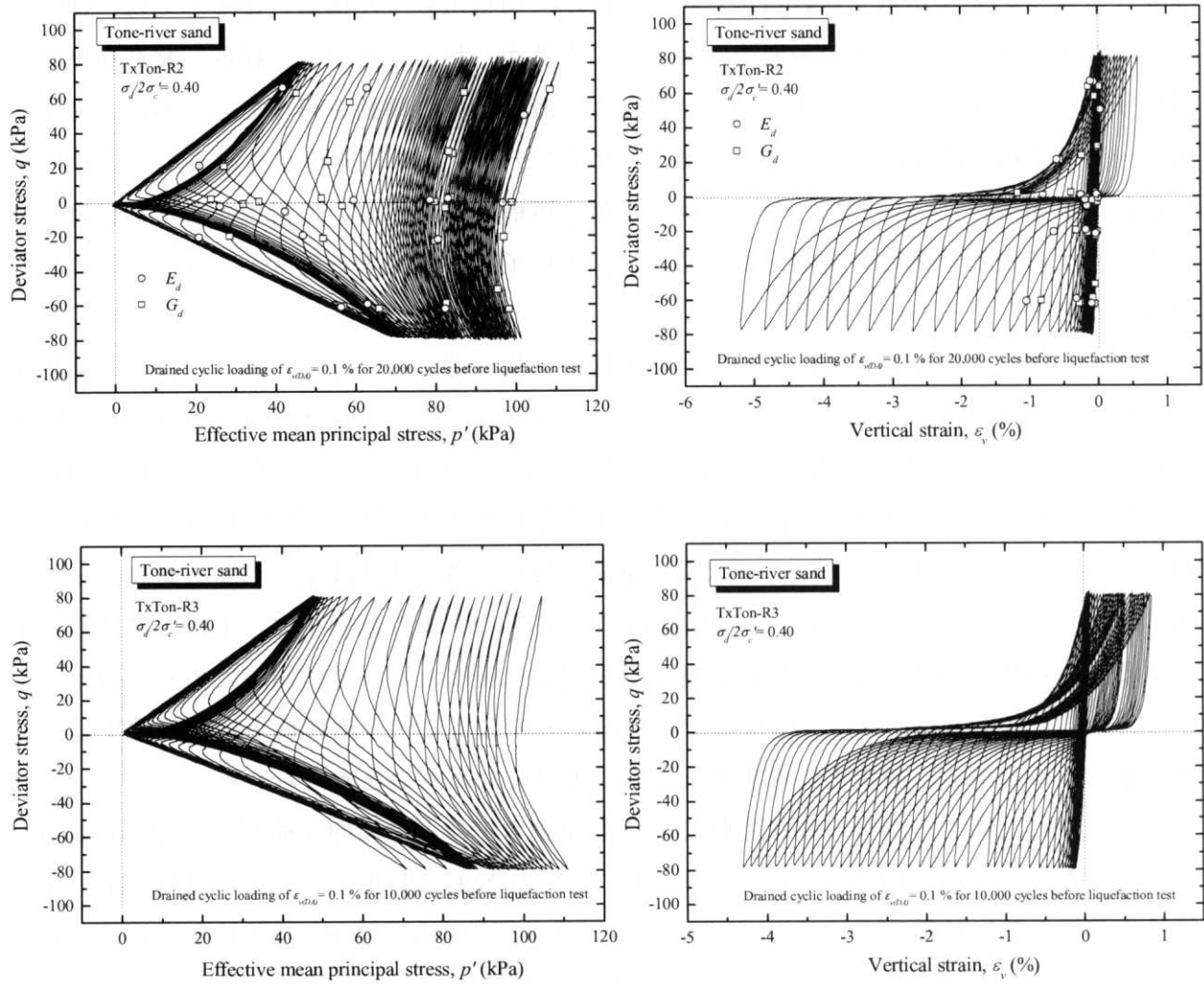


図 5.5.1 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料の液状化試験結果 その1
(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

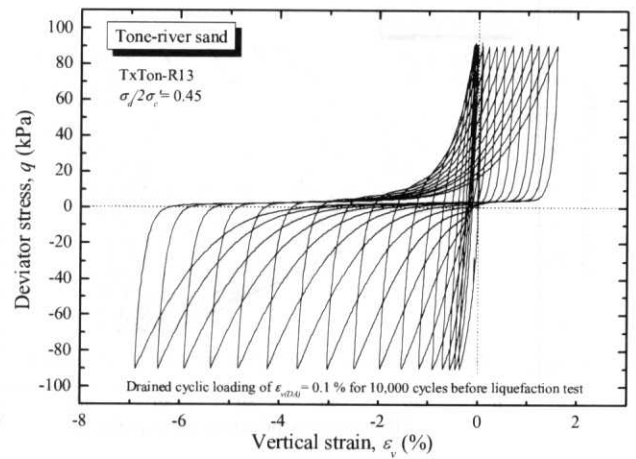
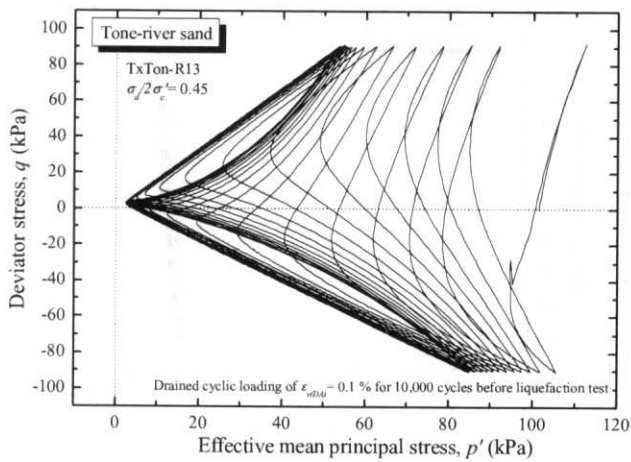
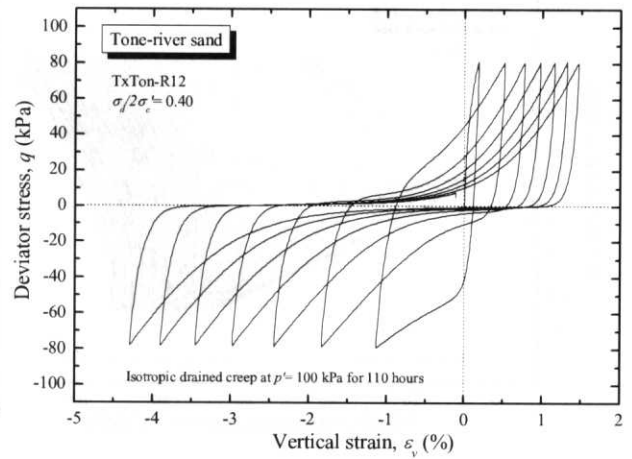
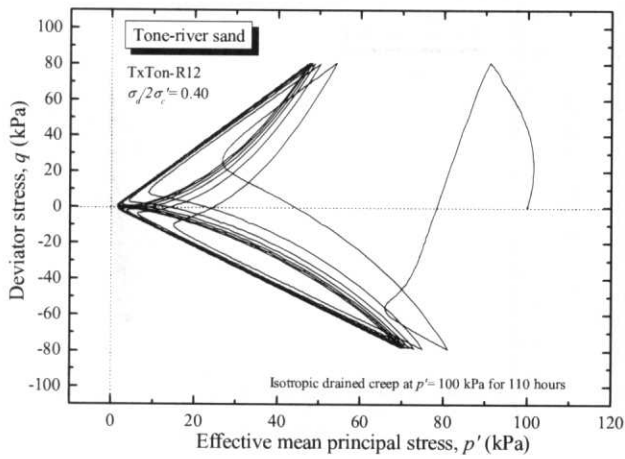
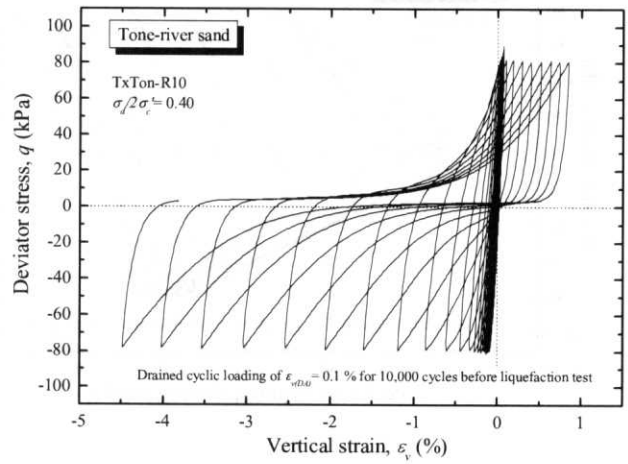
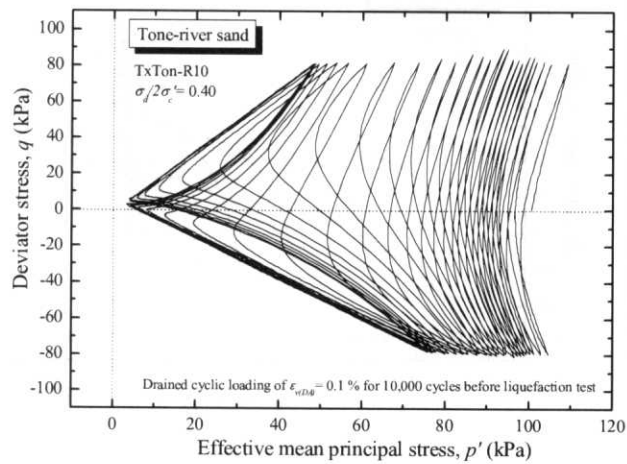


図 5.5.2 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料の液状化試験結果 その2
(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

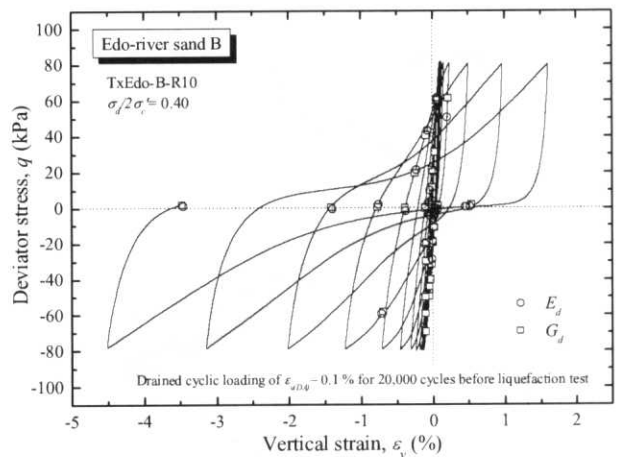
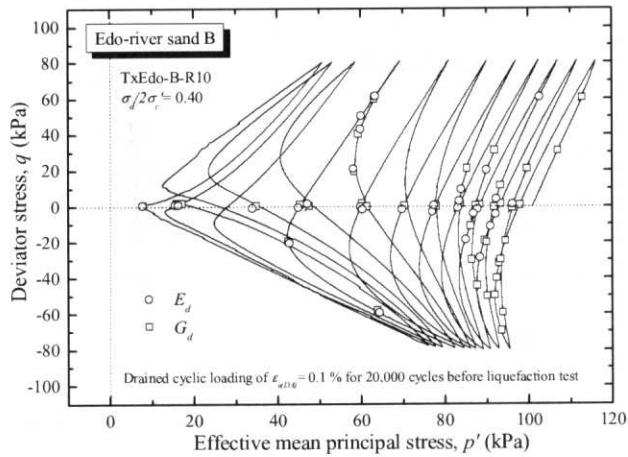
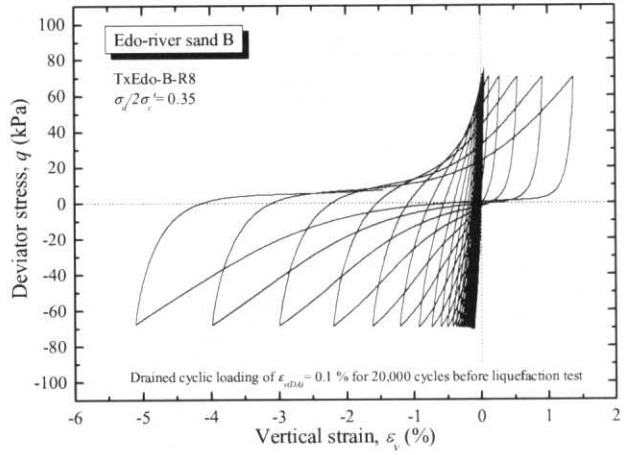
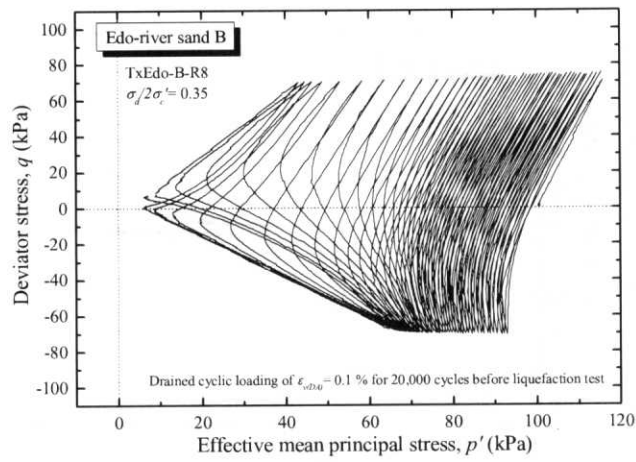
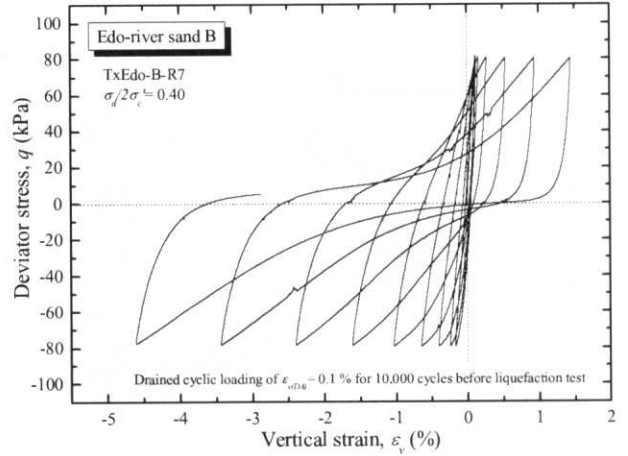
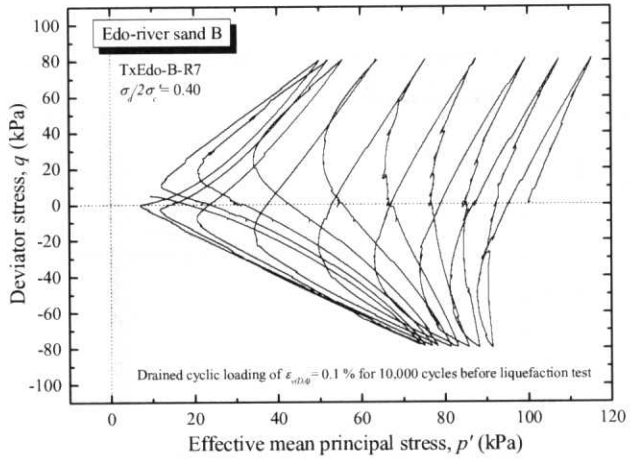


図 5.5.3 応力履歴を受けた江戸川砂 B 再構成試料の液状化試験結果

(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

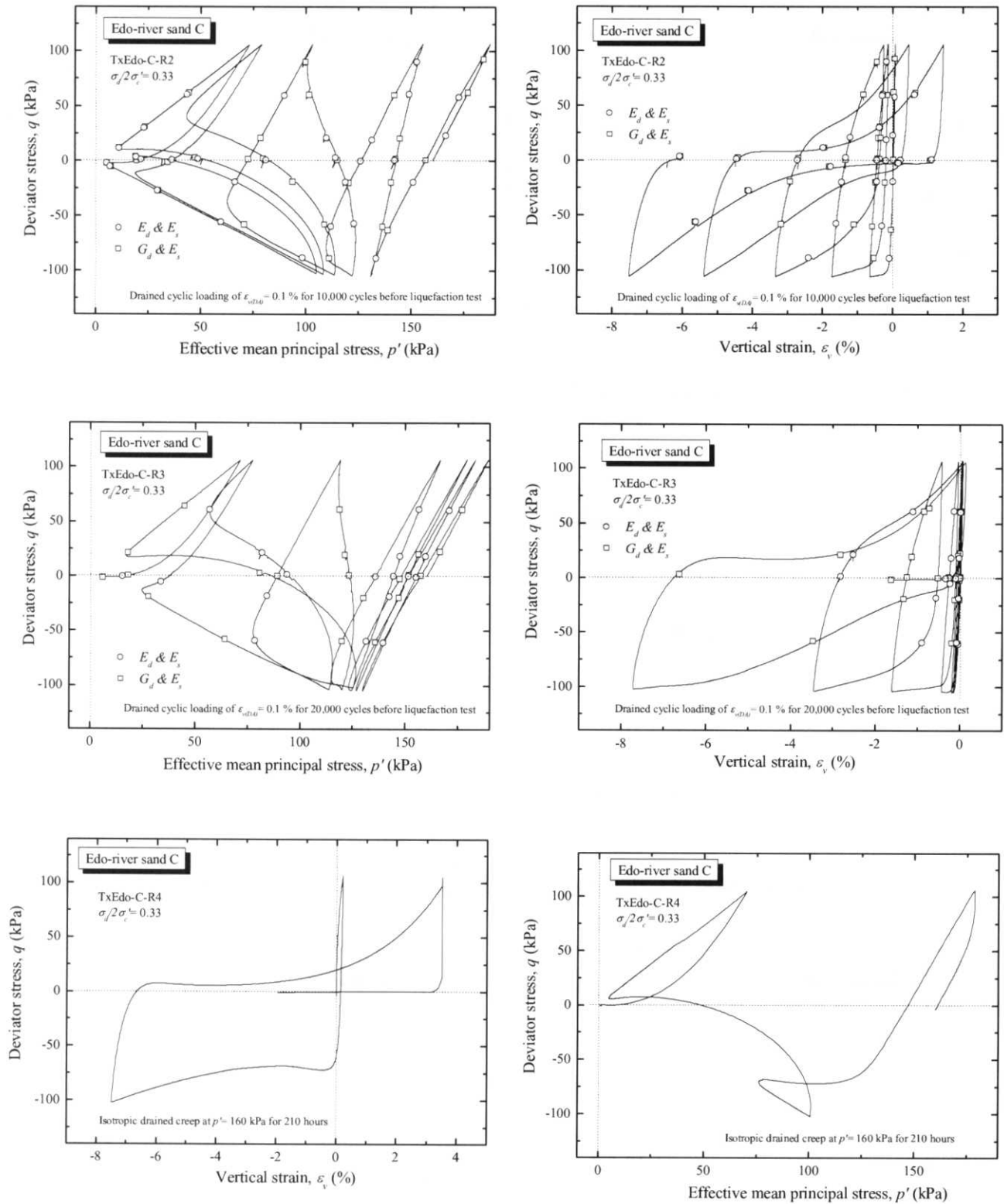


図 5.5.4 応力履歴を受けた江戸川砂 C 再構成試料の液状化試験結果
(左:有効応力経路、右:応力-ひずみ関係)

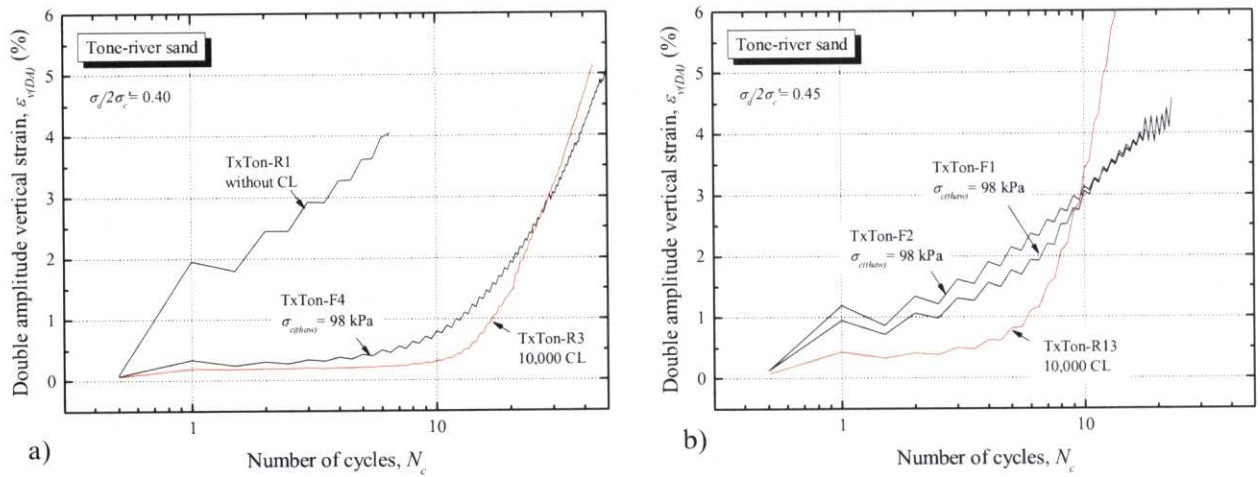


図 5.5.5 利根川砂凍結試料と再構成試料の液状化時繰返し回数と両軸ひずみ振幅の関係

a) $\sigma_d/2\sigma'_c = 0.40$, b) $\sigma_d/2\sigma'_c = 0.45$

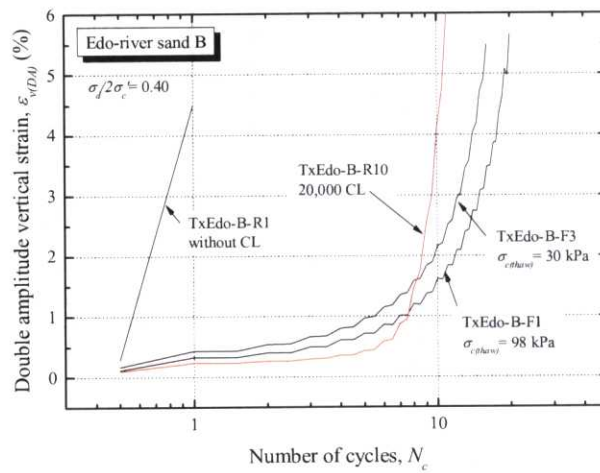


図 5.5.6 江戸川砂 B 凍結試料と再構成試料の液状化時繰返し回数と両軸ひずみ振幅の関係

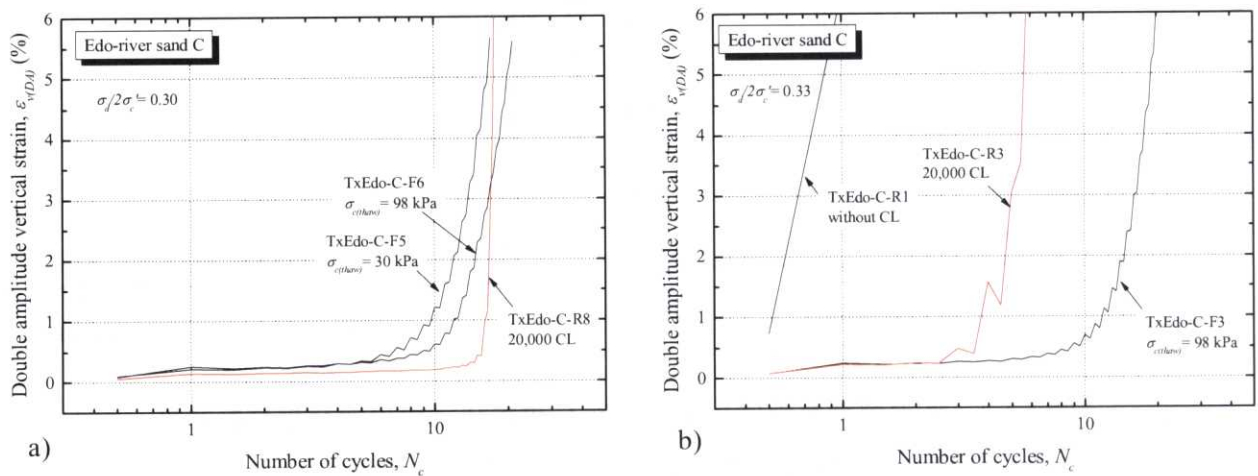


図 5.5.7 江戸川砂 C 凍結試料と再構成試料の液状化時繰返し回数と両軸ひずみ振幅の関係

a) $\sigma_d/2\sigma'_c = 0.30$, b) $\sigma_d/2\sigma'_c = 0.33$

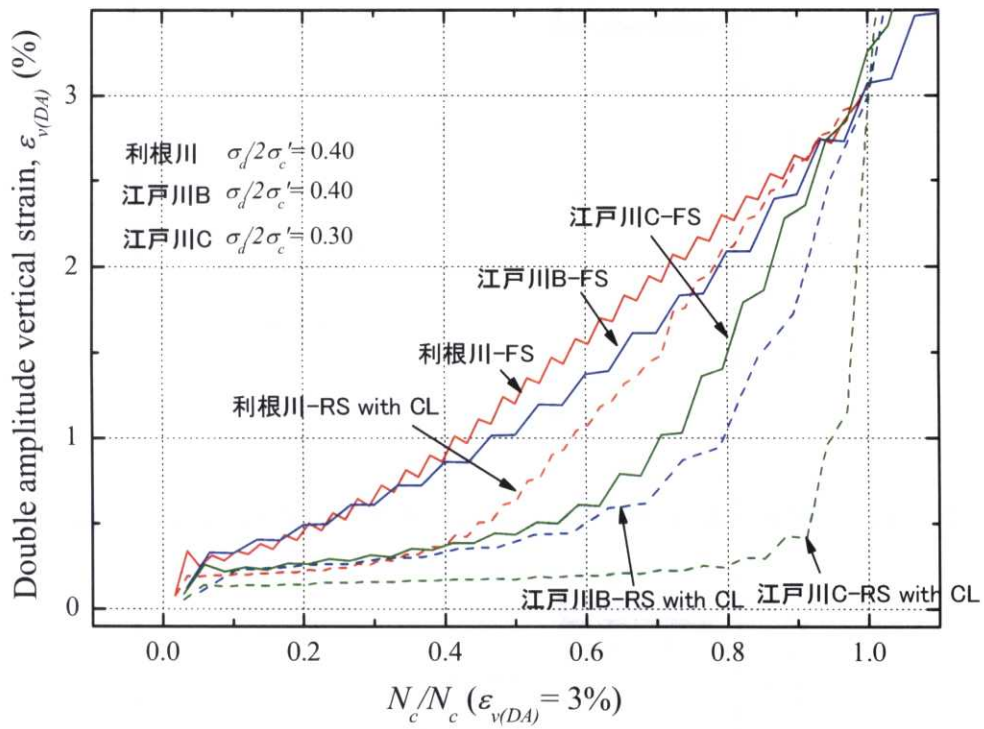


図 5.5.8 各試料の凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の正規化された繰返し回数と軸ひずみ両振幅の関係

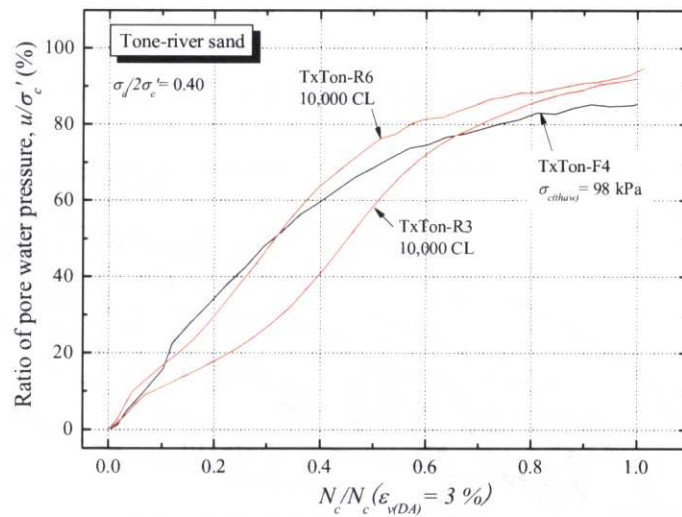


図 5.5.9 利根川砂凍結試料と再構成試料の液状化時繰返し回数と間隙水圧比の関係

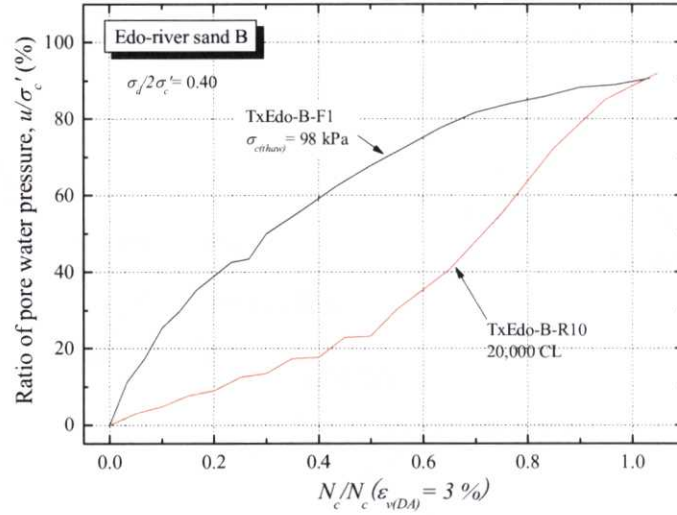


図 5.5.10 江戸川砂 B 凍結試料と再構成試料の液状化時繰返し回数と間隙水圧比の関係

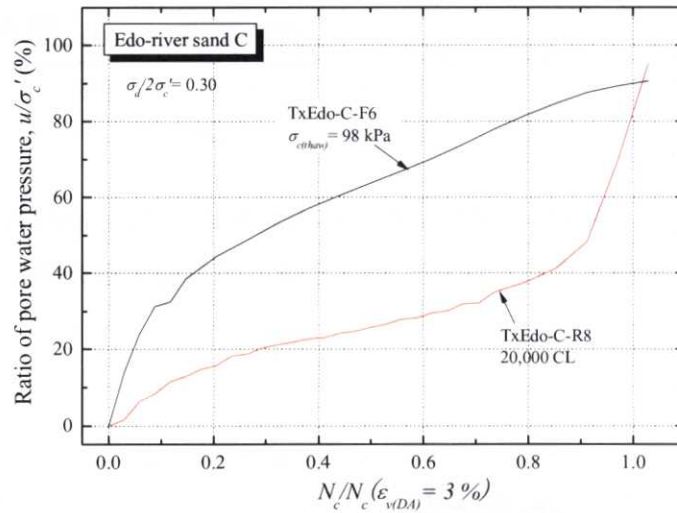


図 5.5.11 江戸川砂 C 凍結試料と再構成試料の液状化時繰返し回数と間隙水圧比の関係

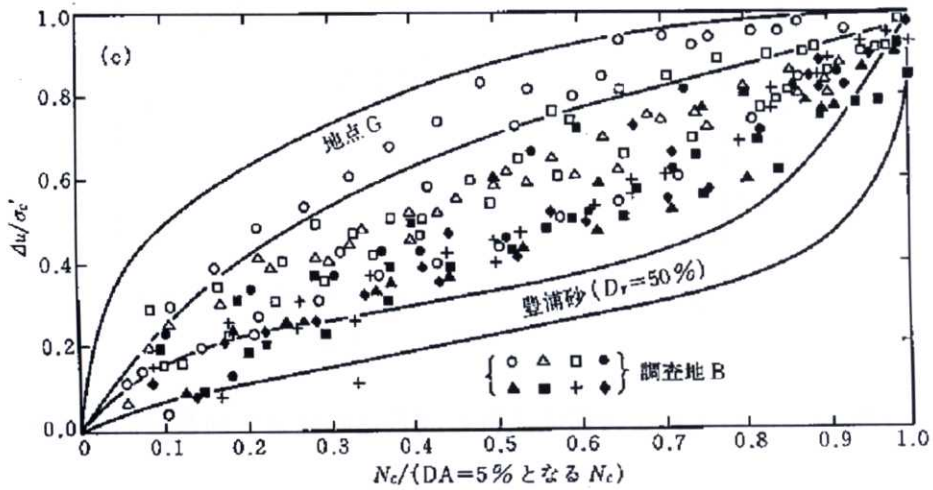


図 5.5.12 液状化強度の異なる試料の液状化時繰返し回数と間隙水圧比の関係

(Tatsuoka et al., 1980)

5.5.2 応力履歴を受けた再構成試料の液状化強度

応力履歴を与えられた利根川砂、江戸川砂 B, C 試料の再構成試料による液状化試験結果として、所定の軸ひずみ振幅に至るまでの繰返し回数を、表 5.5.1~ 表 5.5.3 に、液状化曲線を図 5.5.13~ 図 5.5.15 に示す。

利根川砂再構成試料では、繰返し载荷履歴を与えられることにより、液状化強度は大幅に上昇している。また、10,000 回の繰返し応力履歴を受けた利根川砂再構成試料における、 $\varepsilon_{v(DA)}=3\%$ で定義した液状化曲線は、98 kPa の拘束圧で融解した凍結試料と同程度の値が得られている。

江戸川砂 B, C 試料については、繰返し履歴により液状化強度は上昇するが、繰返し载荷を 20,000 回与えても凍結試料の液状化曲線と一致するまでには至らなかった。

また、各試料の液状化強度 R_{L15} と液状化直前に計測された初期微小変形特性の平均値を表 5.5.4 に示すが、液状化前に与えられた繰返し回数と液状化強度、および各初期微小変形特性の値との間には相関関係があるといえよう。

なお、利根川砂試料、および江戸川砂 C 試料における等方排水クリープ履歴の試料、および江戸川砂 C 試料における低い拘束圧で繰返し履歴を与えられた試料は、応力履歴のない再構成試料と比較してほとんど変化は認められなかった。

表 5.5.1 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料の液状化試験結果

No.	e	応力履歴	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰り返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxTon-R2	0.763	CL: 20,000	0.4	58	65	71
TxTon-R3	0.732	CL: 10,000	0.4	17	29	43
TxTon-R10	0.771	CL: 10,000	0.4	20	24	27
TxTon-R12	0.748	Creep: 110 h	0.4	0.4	2.3	5.3
TxTon-R13	0.694	CL: 10,000	0.45	5.8	10	13

表 5.5.2 応力履歴を受けた江戸川砂 B 再構成試料の液状化試験結果

No.	e	応力履歴	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰り返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxEdo-B-R7	0.807	CL: 10,000	0.4	4.8	7.1	8.6
TxEdo-B-R8	0.818	CL: 20,000	0.35	41	44	46
TxEdo-B-R10	0.807	CL: 20,000	0.4	7.6	10	11

表 5.5.3 応力履歴を受けた江戸川砂 C 再構成試料の液状化試験結果

No.	e	応力履歴	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰り返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)}=1\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=3\%$	$\varepsilon_{v(DA)}=5\%$
TxEdo-C-R2	0.746	CL: 10,000	0.33	1.7	2.9	4.8
TxEdo-C-R3	0.764	CL: 20,000	0.33	3.8	5.9	6.7
TxEdo-C-R4	0.780	Creep: 210 h	0.33	0.6	0.7	0.8
TxEdo-C-R5*	0.736	CL: 20,000	0.33	0.5	0.6	0.7
TxEdo-C-R8	0.773	CL: 20,000	0.3	16	17	18
TxEdo-C-R10	0.683	CL: 20,000	0.5	0.6	0.8	1

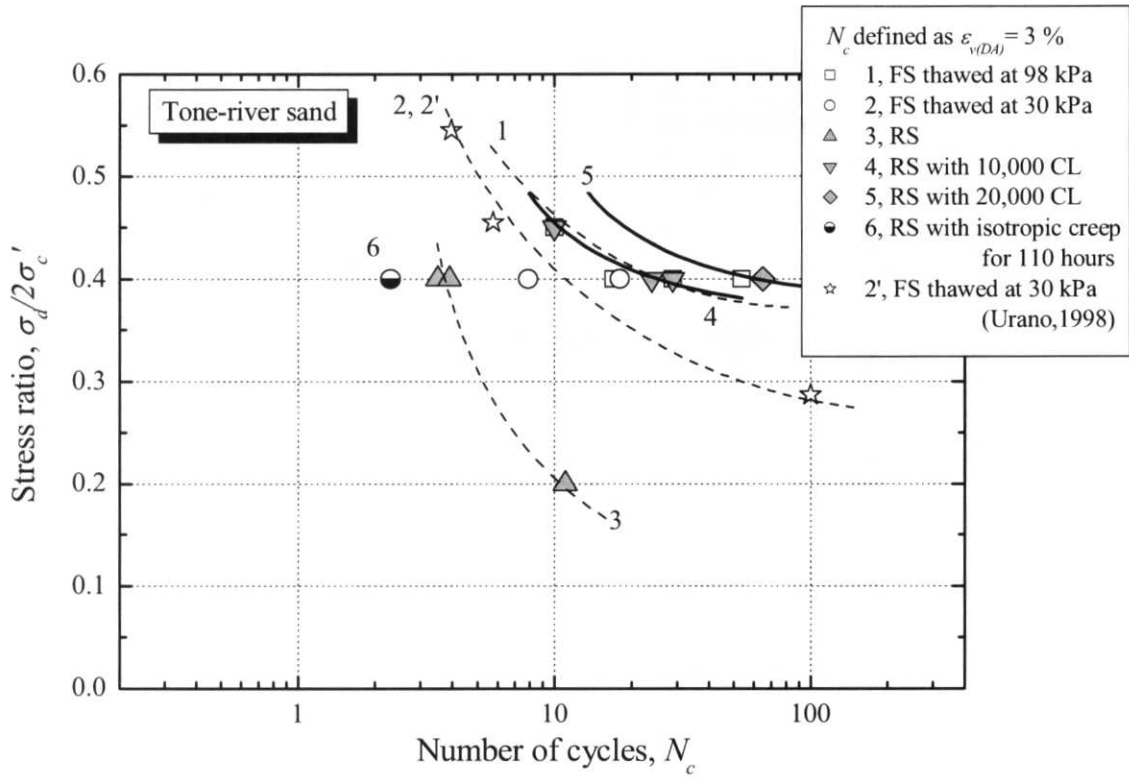


図 5.5.13 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料の液状化強度曲線

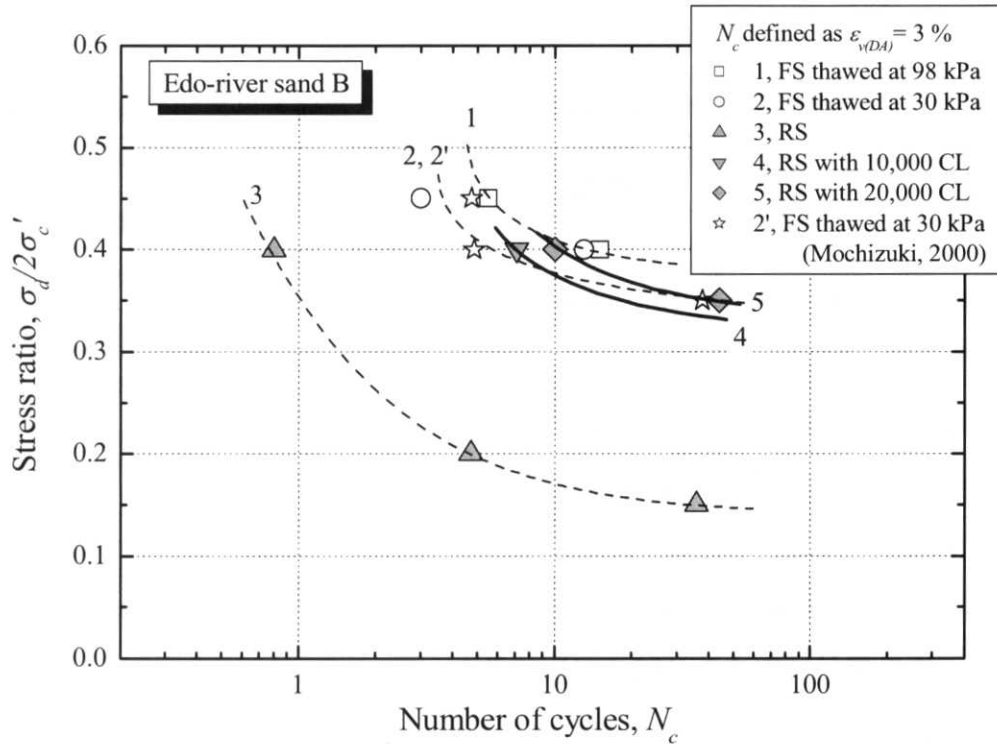


図 5.5.14 応力履歴を受けた江戸川砂 B 再構成試料の液状化強度曲線

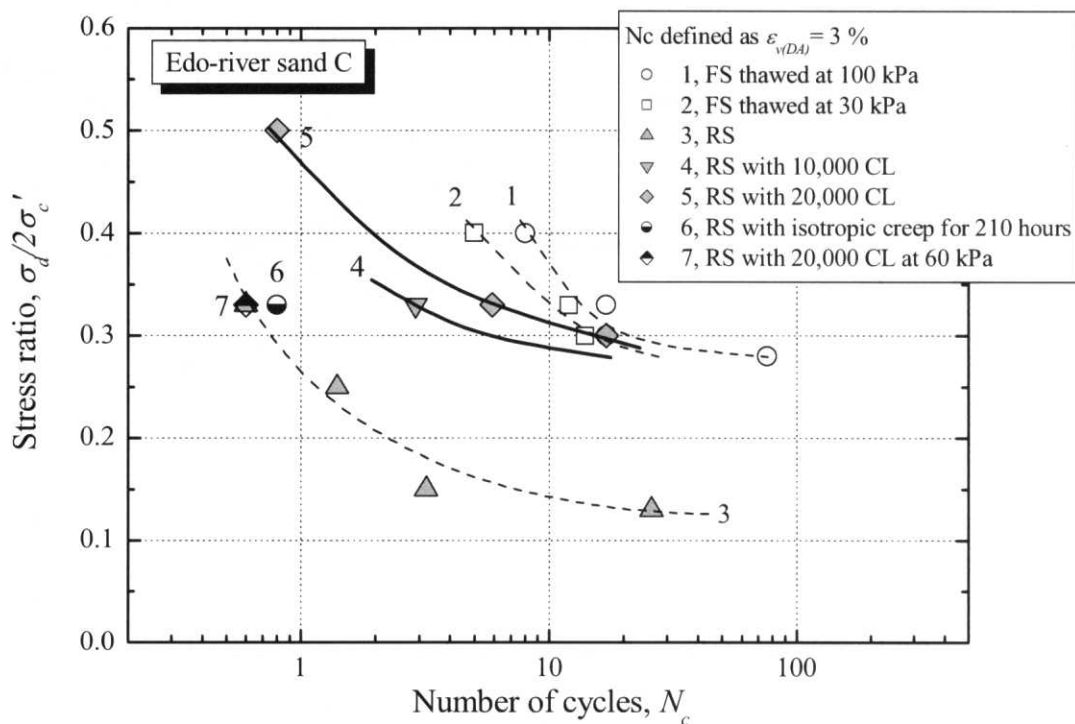


図 5.5.15 応力履歴を受けた江戸川砂 C 再構成試料の液状化強度曲線

表 5.5.4 応力履歴を受けた各再構成試料の液状化強度と平均初期微小変形特性

試料名	Test No.	応力履歴	液状化強度 R_{L15}	平均初期微小変形特性 (MPa)		
				E_{s0}	E_{d0}	G_{d0}
利根川砂 TxTon	R3,10,13	CL: 10,000	0.43	188.3	329.8* 1166.5	109.9
	R2	CL: 20,000	0.47	-	352*	134.8
江戸川砂 B TxEdo-B	R7	CL: 10,000	0.36	182.2	687.3	109.5
	R8,10	CL: 20,000	0.38	214.4	614.2	117.1
江戸川砂 C TxEdo-C	R2	CL: 10,000	0.28	360.5	1277.8	218.0
	R3,8,10	CL: 20,000	0.30	334.6	1161.9	229.6

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

5.5.3 応力履歴を受けた再構成試料の液状化過程における微小変形特性

応力履歴を受けた再構成試料の液状化中における微小変形特性について、図 5.5.15, 図 5.5.16 に利根川砂、図 5.5.17 に江戸川砂 B 試料、および図 5.5.18, 図 5.5.19 に江戸川砂 C 試料の結果を示す。ヤング率は鉛直有効応力 σ_v' と、せん断剛性率については応力関数 $(\sigma_v'\sigma_h')^{0.5}$ との関係を示したが、これまでの凍結試料と応力履歴のない再構成試料の場合と同様、動的せん断剛性率 G_d については、応力関数 $(\sigma_v'\sigma_h')^{0.5}$ と良い相関関係を示している。一方、動的ヤング率 E_d についてはばらつきが非常に大きい。全体的に、ヤング率・せん断剛性率共に、応力履歴により液状化前に計測した剛性は増加しているが、液状化に伴い剛性は低下し、応力履歴を与える前の等方圧密過程において計測した値に漸近する傾向が認められる。

液状化中の動的せん断剛性率 G_d の低下について、応力履歴を受けた再構成試料と応力履歴のない再構成試料の結果を比較したものを図 5.5.20~ 図 5.5.22 に示す。なお、これらの図では比較を容易に行うため、普通軸で表している。応力履歴の有無と G_d の関係は各試料とも非常に似通っており、繰返し载荷によって上昇した動的せん断剛性率は、液状化初期段階において急激に低下し、応力履歴のない再構成試料の結果に近づく傾向を呈する。また、応力履歴を受けた再構成試料の G_d の値が、応力履歴のない再構成試料の値に接近する時点の軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)}$ は、利根川砂および江戸川砂 B 試料では 1.0 %以下、江戸川砂 C 試料でも極端に大きな $\varepsilon_{v(DA)}$ の値を示す試料を除けば 1.5 %程度となっている。このような液状化初期段階における G_d の急激な低下傾向は、年代効果として土粒子構造の安定化のみを有する地盤の挙動と対応しているといえる (5.4 参照)。

次に、液状化中の動的せん断剛性率 G_d の低下について、応力履歴を受けた再構成試料と凍結試料の結果を比較したものを図 5.5.23~ 図 5.5.28 に示す。利根川砂試料については、再構成試料と凍結試料 ($\sigma'_c=98$ kPa) の結果は比較的整合性が認められ、特に液状化中の G_d を初期剛性 G_{d0} で正規化した値で整理すると、両者の G_d の分布はほぼ一致しているといえる (図 5.5.16, 図 5.5.17)。したがって、利根川砂については、凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料の年代効果のタイプ (即ち土粒子構造の安定化) が対応していたことを示唆している。また、表 5.3.5 に示した利根川砂凍結試料と、表 5.5.4 に示した応力履歴を受けた再構成試料の液状化強度 R_{L15} と初期微小変形特性は概ね同等の値であったことから、年代効果として土粒子構造の安定化のみを有する地盤 (主に沖積層) に対しては、応力履歴により初期微小変形特性を対応させることで、液状化中の挙動を再構成試料によって再現できると考えられる。

一方、江戸川砂 B, C 試料については、凍結試料と再構成試料で G_{d0} の値が異なるため一概に比較できないが、 G_d の低下傾向 (図 5.5.25, 図 5.5.27) は若干異なる。具体的には応力履歴を受けた再構成試料の G_d の低下は液状化初期段階で急激に生じるが、凍結試料については 5.3, 5.4 でも述べたように、 G_d の低下はセメンテーション効果により緩やかに生じている。また、 G_d を G_{d0} で正規化した結果を図 5.5.26, 図 5.5.28 に示すが、江戸川砂 B, C 試料共に、凍結試料の

液状化初期段階における G_d の変化の違いが明確に現れているといえる。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ることで、履歴のない試料よりも高い微小変形特性と液状化強度 R_{L15} を実現し、凍結試料の結果に近づけることができた。しかし、繰返し载荷履歴のみでは、たとえ 20,000 回の履歴を与えたとしても、セメンテーション効果を再現することはできず、江戸川砂 B, C 試料のような洪積層の場合、凍結試料の液状化挙動を忠実に再現することは難しいと考えられる。

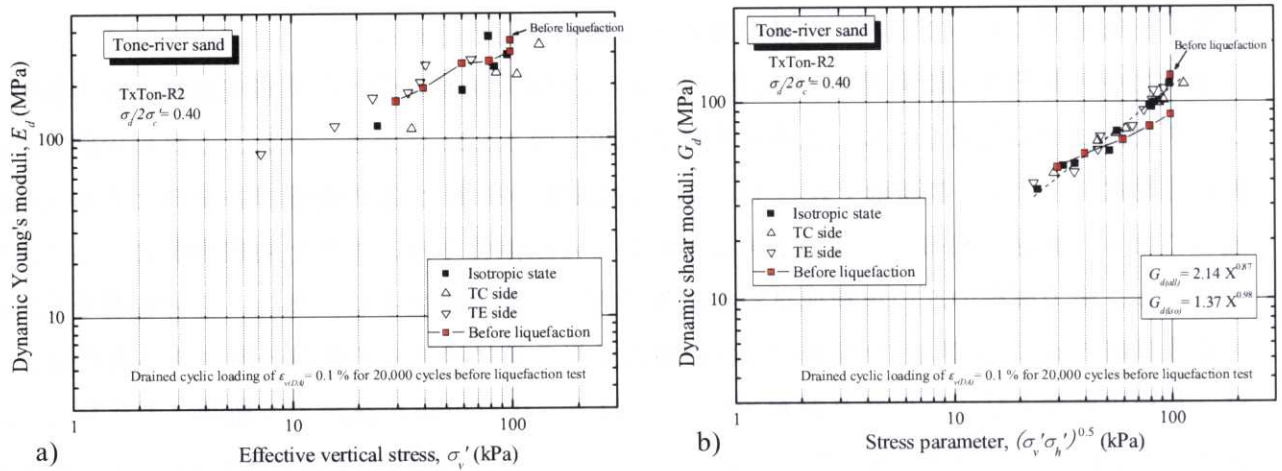


図 5.5.15 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料 (TxTon-R2) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

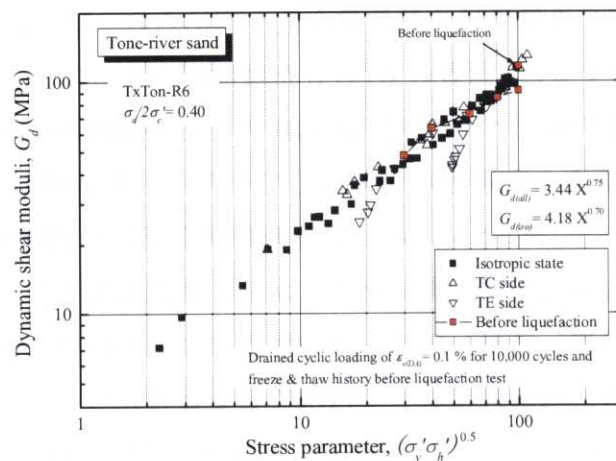


図 5.5.16 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料 (TxTon-R6) の液状化過程における G_d

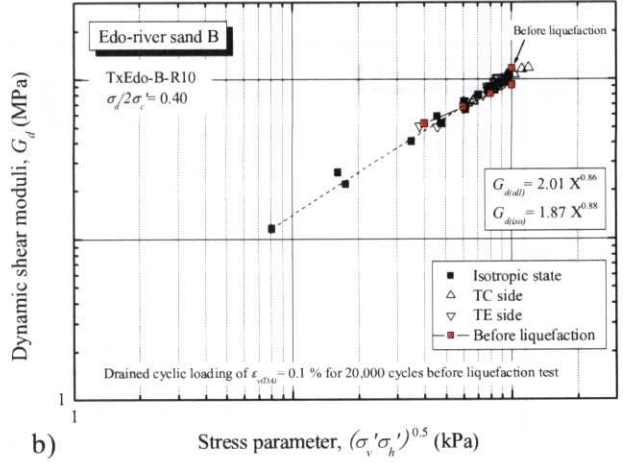
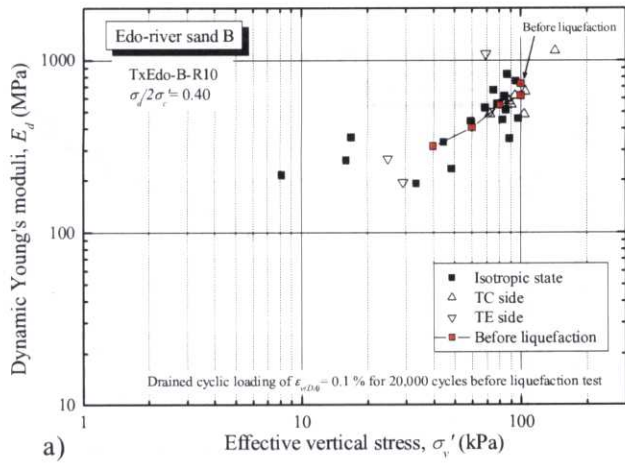


図 5.5.17 応力履歴を受けた江戸川砂 B 再構成試料 (TxEdo-B-R10) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

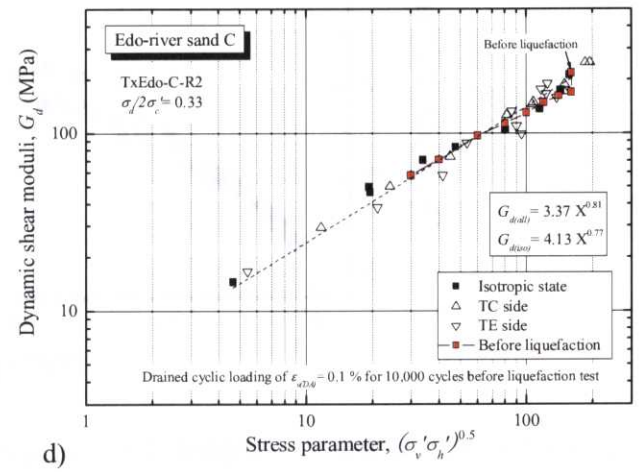
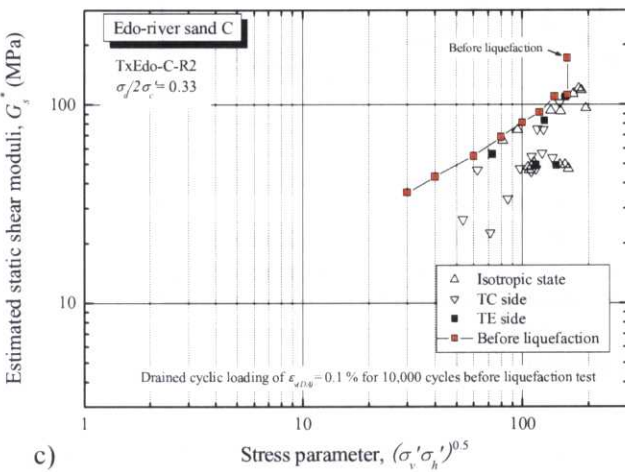
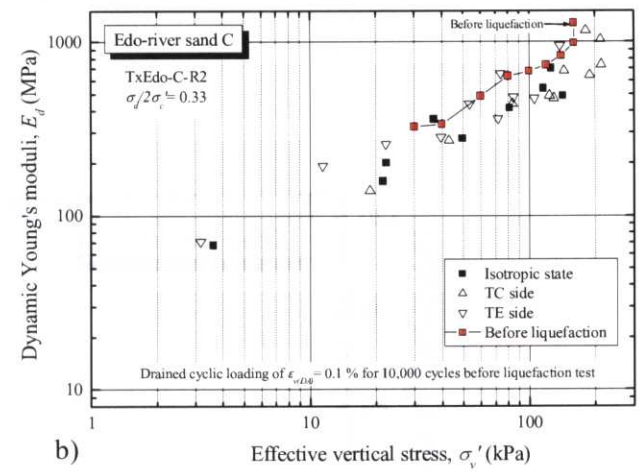
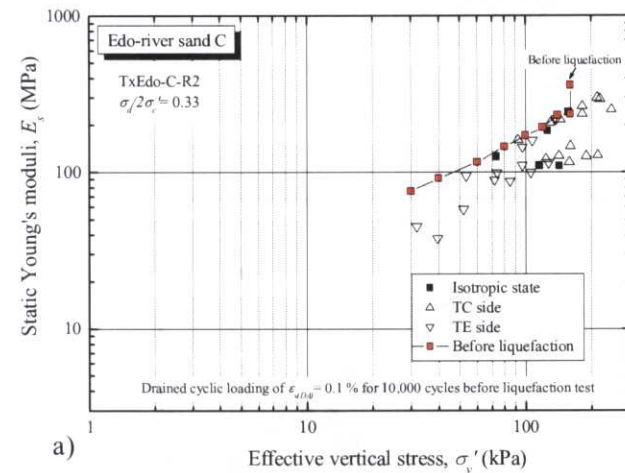


図 5.5.18 応力履歴を受けた江戸川砂 C 再構成試料 (TxEdo-C-R2) の液状化過程における a) E_s^* , b) E_d , c) G_s^* , d) G_d

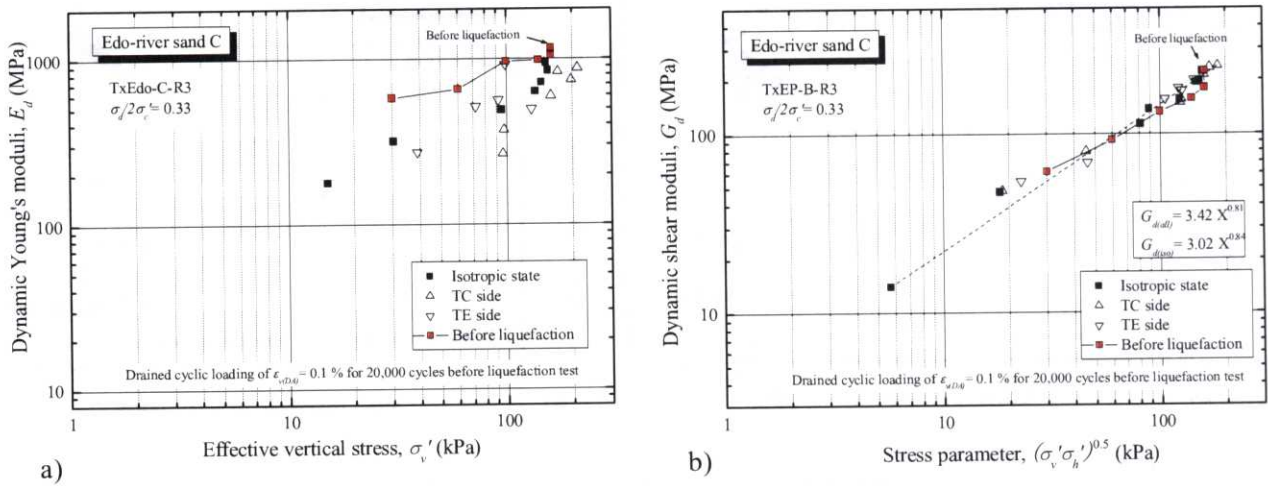


図 5.5.19 応力履歴を受けた江戸川砂 C 再構成試料 (TxEdo-C-R2) の液状化過程における a) E_d , b) G_d

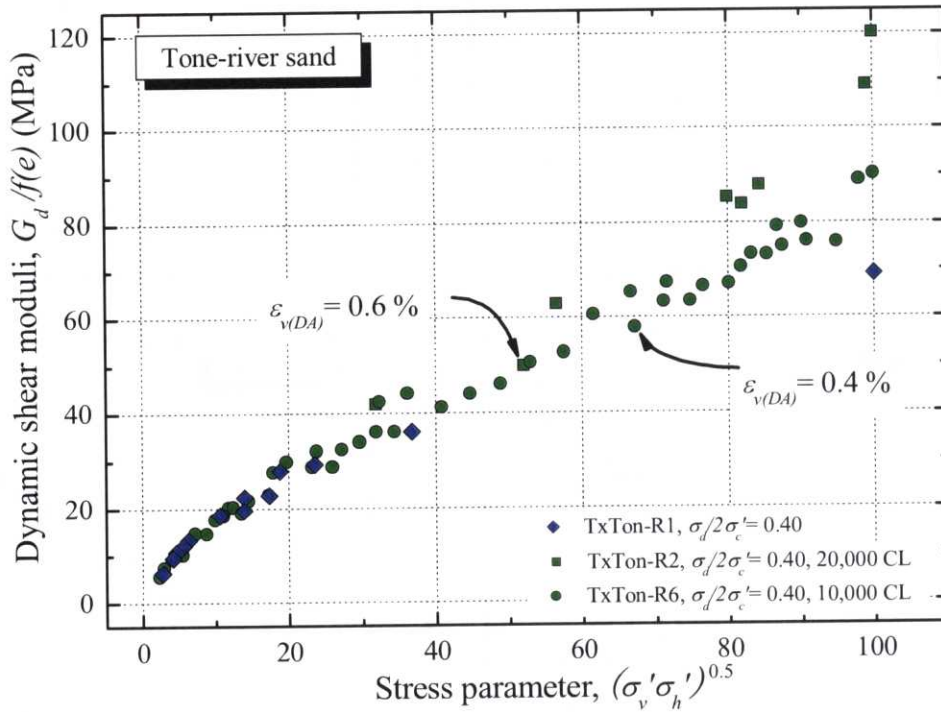


図 5.5.20 応力履歴のない再構成試料と応力履歴を有する再構成試料の液状化過程における G_d (利根川砂試料)

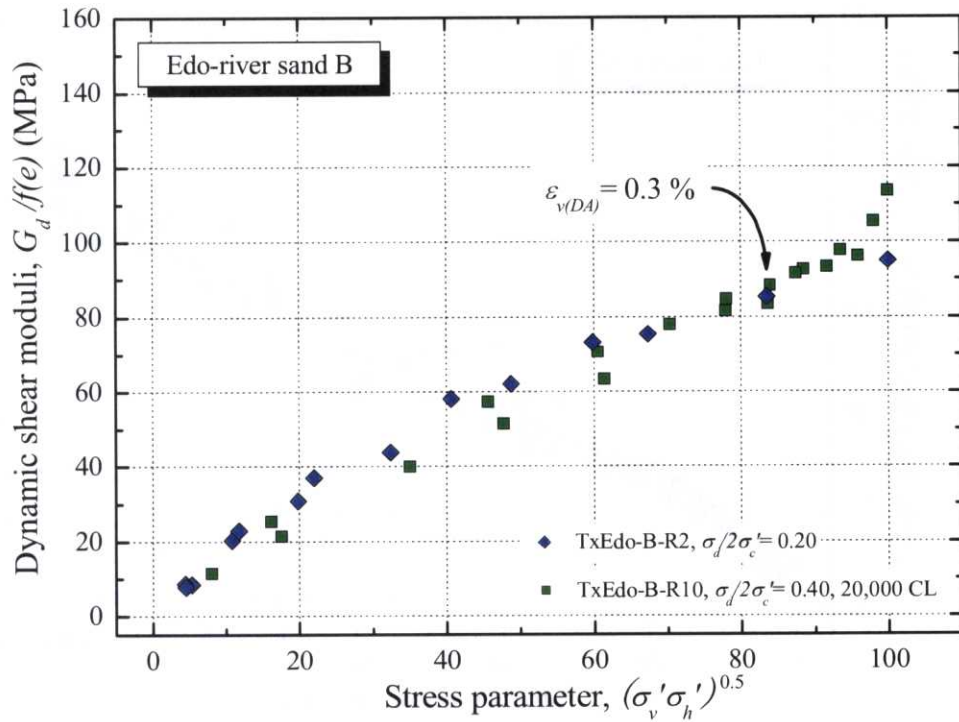


図 5.5.21 応力履歴のない再構成試料と応力履歴を有する再構成試料の液状化過程における G_d (江戸川砂 B 試料)

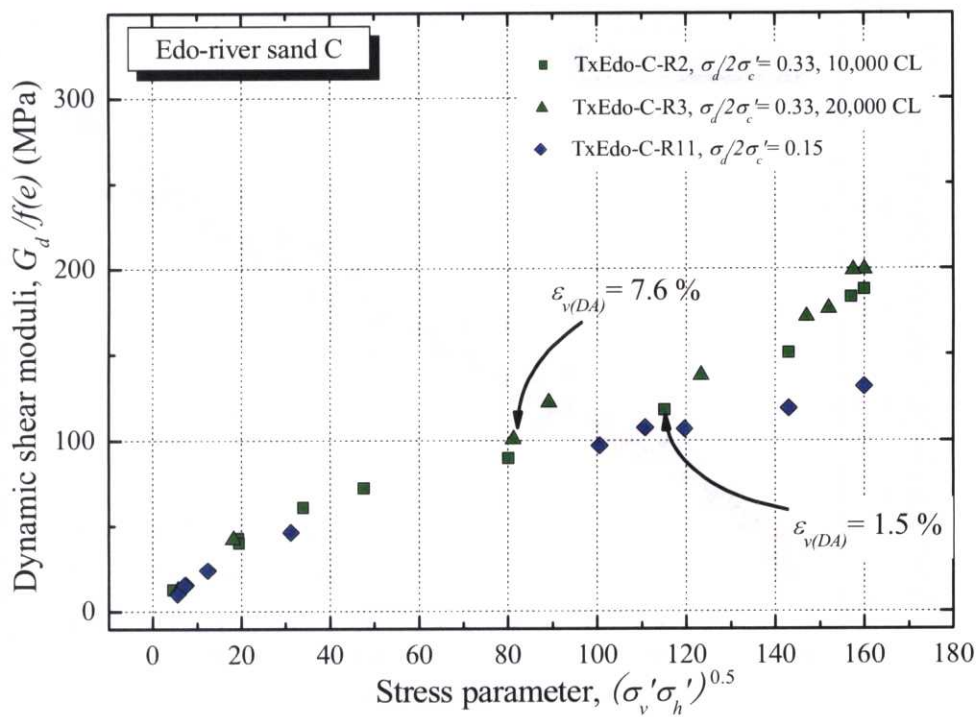


図 5.5.22 応力履歴のない再構成試料と応力履歴を有する再構成試料の液状化過程における G_d (江戸川砂 C 試料)

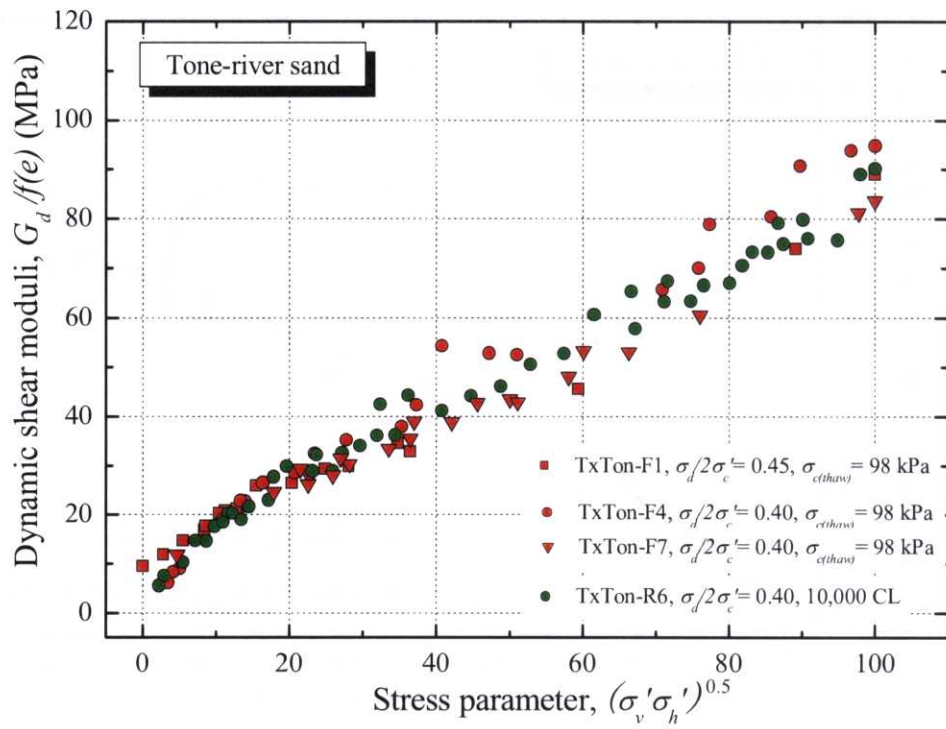


図 5.5.23 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d

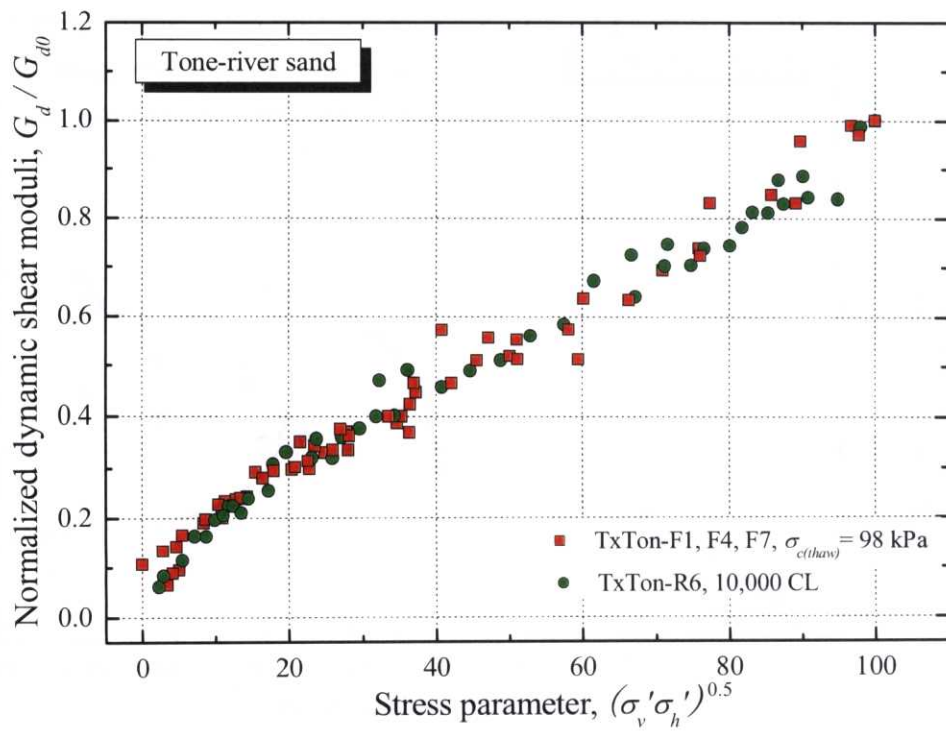


図 5.5.24 応力履歴を受けた利根川砂再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

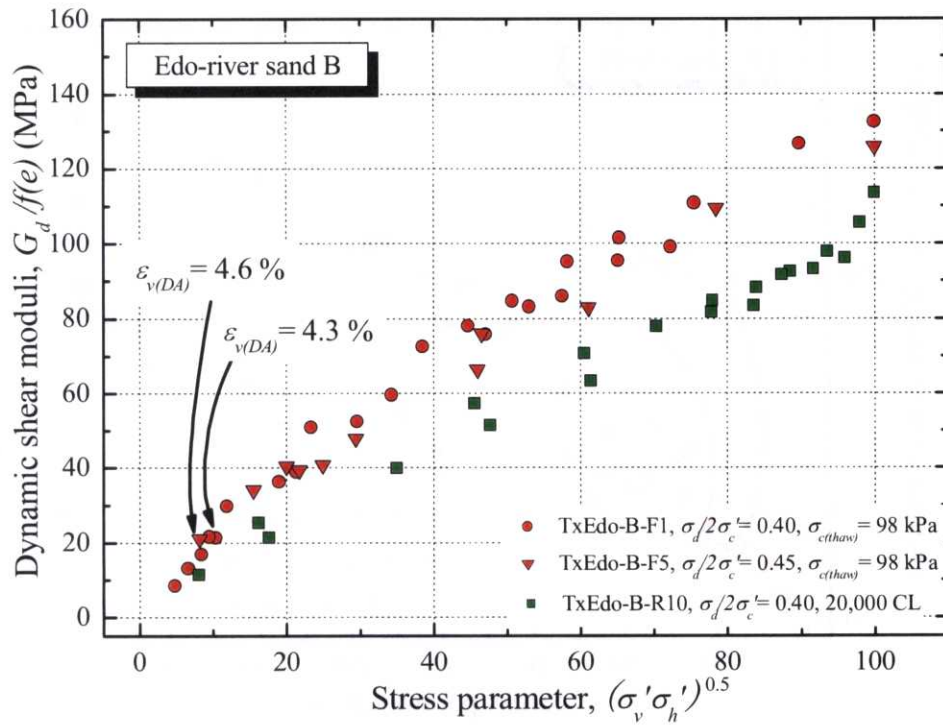


図 5.5.25 応力履歴を受けた江戸川砂 B 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d

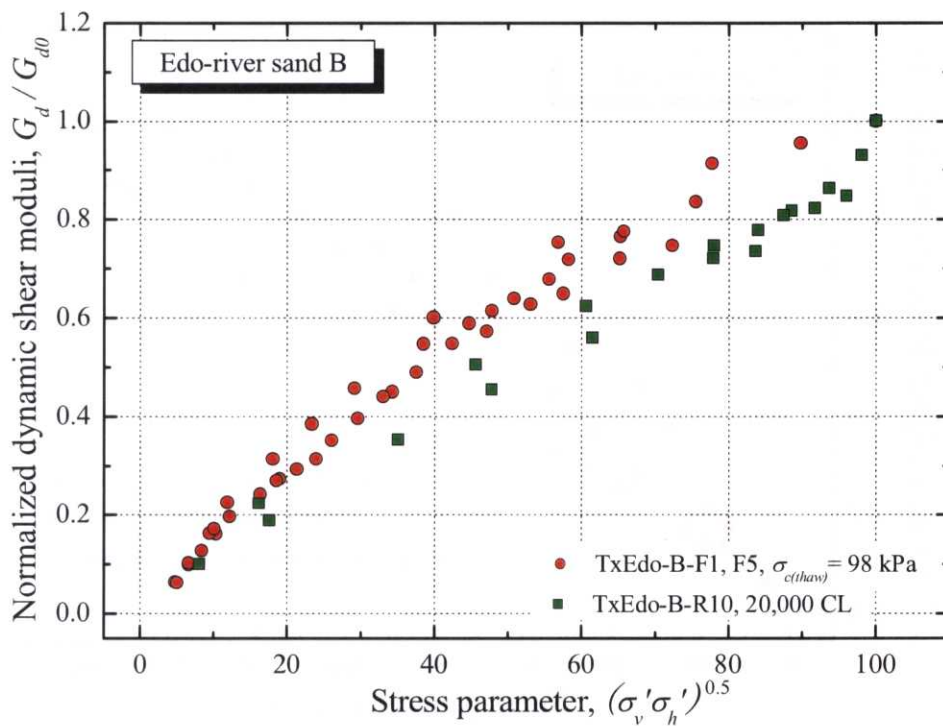


図 5.5.26 応力履歴を受けた江戸川砂 B 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

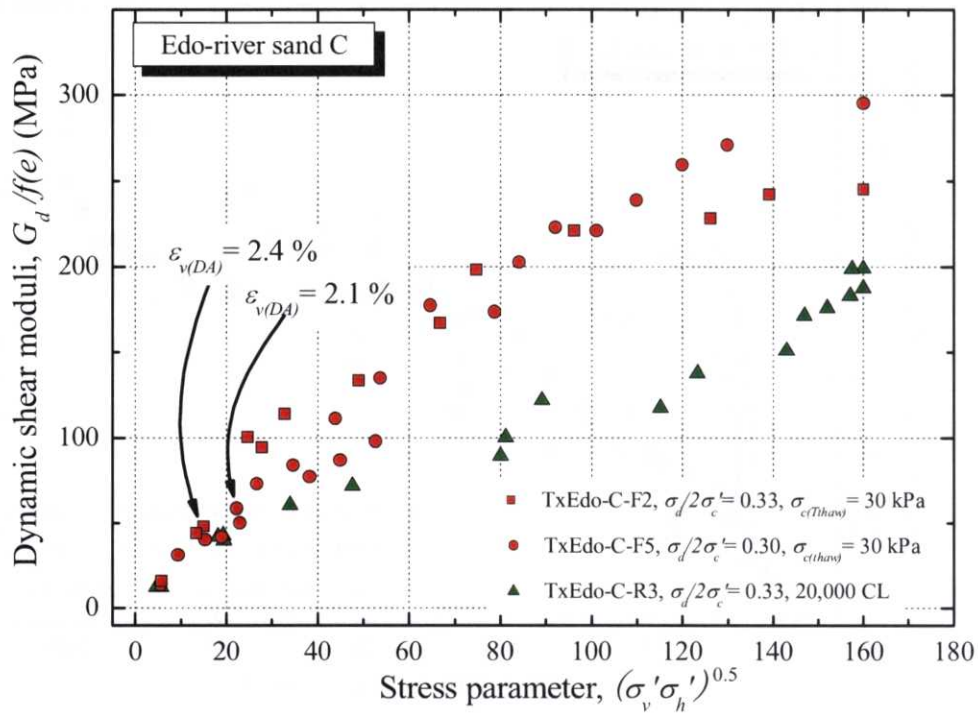


図 5.5.27 応力履歴を受けた江戸川砂 C 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d

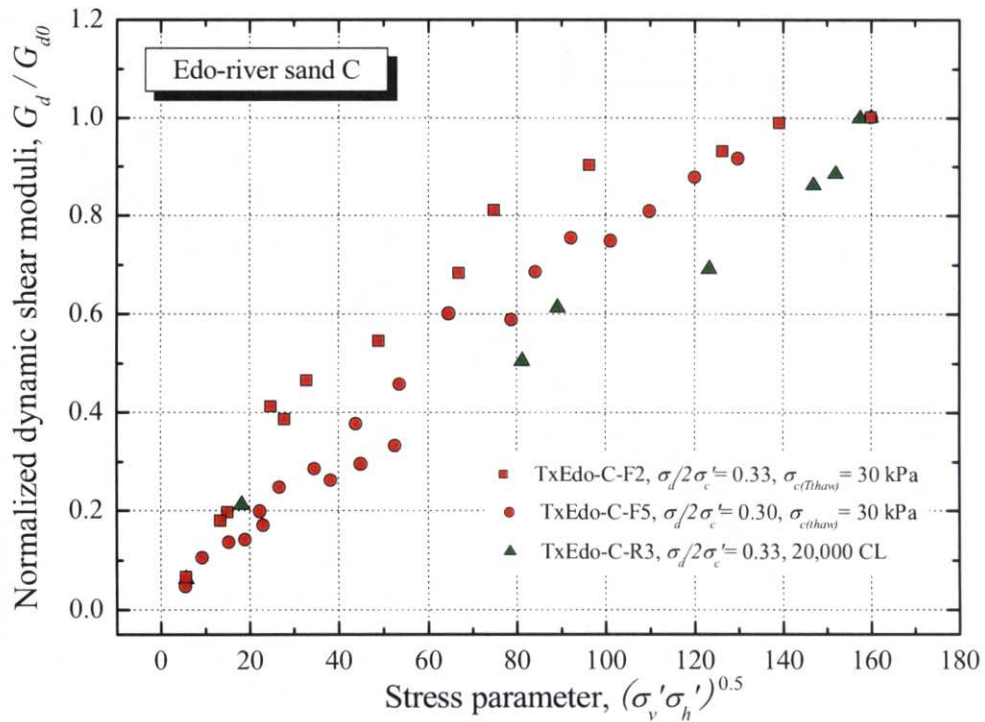


図 5.5.28 応力履歴を受けた江戸川砂 C 再構成試料と凍結試料の液状化過程における G_d/G_{d0}

5.6 凍結融解履歴と液状化強度特性

応力履歴（10,000 CL）を受けた利根川砂再構成試料に凍結・融解を与えた後、液状化試験を実施した。なお、各供試体の凍結時拘束圧 $\sigma_{c(freeze)}$ はいずれも 98 kPa であったが、融解時拘束圧は供試体により $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa と 30 kPa とし、凍結試料と同様、融解時拘束圧の液状化特性に及ぼす影響も検討した。各供試体の所定の軸ひずみ振幅に至るまでの繰返し回数を表 5.6.1 に、軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)} = 3\%$ で整理した液状化強度曲線を図 5.6.1 に示す。また、繰返し回数 15 回で定義した液状化強度 R_{L15} を表 5.6.2 に示す。

利根川砂試料の凍結時の体積ひずみを前章にて示したが、細粒分含有率が約 2 % 未満とかなり低いことから、凍結に伴う体積膨張は平均 0.4 % 程度とかなり小さかった。Goto (1993) によると、凍結膨張体積ひずみが 0.5 % 以下であれば凍結膨張が試料の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（図 5.2.7）。本研究においても、図 5.6.1 に示すように、凍結時拘束圧と融解時拘束圧が同じ値（98 kPa）であった TxTon-R6, R7 による液状化強度曲線は、凍結融解履歴のない同一の応力履歴を有する再構成試料の結果とほぼ整合しており、凍結履歴による液状化強度の低下はほとんどないものと考えられる。しかし、凍結試料では融解時拘束圧の低下により液状化強度と微小変形特性が低下したが、図 5.6.1、表 5.6.2 に示すように、応力履歴を受けた再構成試料においても、融解時拘束圧の違いによる液状化強度、および動的せん断剛性率 G_d の低下が認められた。一方、再構成試料による融解拘束圧の違いによる液状化強度の低下の割合は 7% 程度と、凍結試料の場合（約 14%）と比較して小さかった。凍結試料の融解時体積ひずみは今回の再構成試料よりもかなり大きな値（約 4~6 倍）となっていることから、再構成試料の凍結条件が凍結採取試料の場合と異なっていたことが原因の一つとして考えられる。また、表 5.6.2 に示すように、融解時拘束圧が低い場合（ $\sigma_{c(thaw)} = 30$ kPa）の初期動的せん断剛性率 G_{d0} の値は、高い場合（ $\sigma_{c(thaw)} = 98$ kPa）と比較して、平均 16.5% 程度低下している。

表 5.6.1 凍結融解履歴を受けた利根川砂再構成試料の液状化試験結果

No.	e	凍結融解履歴 $\sigma_{c(freeze)}$ (kPa) / $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	応力比 振幅 $\sigma_d/2\sigma'_c$	繰返し回数 N_c		
				$\varepsilon_{v(DA)} = 1\%$	$\varepsilon_{v(DA)} = 3\%$	$\varepsilon_{v(DA)} = 5\%$
TxTon-R6	0.692	98 / 98	0.4	15	34	56
TxTon-R7	0.710	98 / 98	0.4	19	31	43
TxTon-R8	0.730	98 / 30	0.4	10	15	21
TxTon-R9	0.764	98 / 30	0.45	0.89	3.9	7.3

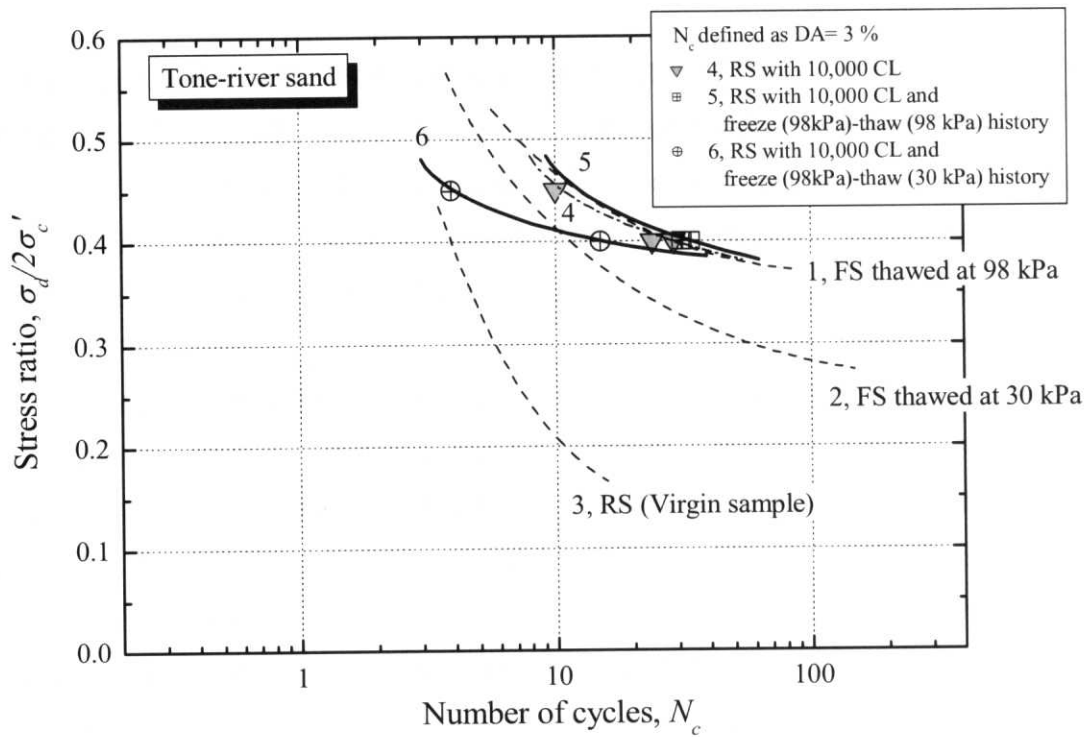


図 5.6.1 凍結・融解履歴を受けた利根川砂再構成試料の液状化強度曲線

表 5.6.2 凍結・融解履歴を受けた利根川砂再構成試料の液状化強度と平均初期微小変形特性

試料名	凍結融解履歴 $\sigma_{c(freeze)}$ (kPa) / $\sigma_{c(thaw)}$ (kPa)	凍結/融解体積 ひずみ	液状化 強度 R_{L15}	平均初期微小変形特性 (MPa)		
				E_{s0}	E_{d0}	G_{d0}
TxTon-R6	98 / 98	-0.580 / 0.527	0.43	185.65	329.9*	115.6
TxTon-R7	98 / 98	-0.248 / 0.335				
TxTon-R8	98 / 30	-0.548 / 0.357	0.40	195.45	806.1	97.4
TxTon-R9	98 / 30	-0.163 / 0.304				

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

5.7 液状化強度と微小変形特性との関係

これまでの一連の実験において、凍結・融解履歴に起因する供試体の乱れ、および凍結・再構成試料における年代効果と応力履歴が液状化強度に及ぼす影響を検討した。ここでは、液状化試験直前に計測した初期微小変形特性と、各試料の液状化強度との関係を総合的に述べる。

初期微小変形特性（静的ヤング率 E_{s0} 、動的ヤング率 E_{d0} および動的せん断剛性率 G_{d0} ）と液状化強度 R_{LI5} との関係について、図 5.7.1～図 5.7.3 にそれぞれ利根川砂試料、江戸川砂 B, C 試料の結果を示す。また、表 5.7.1 に試験結果の一覧を示す。

結果より、全体的に初期微小変形特性と液状化強度との間には相関があると考えられる。特に G_d と R_{LI5} との関係については、すべての試料において G_d の低下と共に R_{LI5} も低下しており、原地盤の液状化強度を推定する上で G_d は重要なパラメータとなることを示唆している。また、このようなせん断剛性率と液状化強度との関係について検討した過去の研究においても同様の見解が得られている（e.g., Tokimatsu, et al., 1986）。また、動的・静的ヤング率 E_s , E_d についても、全体的には R_{LI5} と相関があることが認められるが、 E_d については間隙水の影響によると思われる結果のばらつきが大きくなっており、 G_d と比較して R_{LI5} との相関はクリアではない。

また、比較的 R_{LI5} との良い相関が得られた動的せん断剛性率 G_{d0} について、各試料の結果をまとめたものを図 5.7.4 に示す。なお、図 5.7.4 の動的せん断剛性率については、 $\sigma'_c = 160$ 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、 $\sigma'_c = 100$ kPa の値に正規化した値 (G_{dN}) を用いている。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時の値より設定した。結果より、同じ拘束圧 ($\sigma'_c = 100$ kPa) で液状化試験が行われた利根川砂と江戸川砂 B 試料の結果は概ね対応しているが、江戸川砂 C 試料については他の試料と異なる傾向を示している。

Tokimatsu & Uchida (1990) および時松&鈴木 (1994) は、式[5.4]に示すように拘束圧依存性を考慮して最小間隙比関数 $f(e_{min})$ により動的せん断剛性率を正規化した場合、動的せん断剛性率と液状化強度の間には試料の違いによらず一意的な関係が得られると報告している。ここで、 σ'_m は平均有効主応力であり、間隙比関数 $f(e_{min})$ については、各試料の最小間隙比を Hardin & Richart (1963) の間隙比関数（式[4.1]）に代入したものである。今回の結果についても同様の手法で G_{d0} の正規化を行い (G_{dN}^*)、各試料の液状化強度との関係を求めた。結果を図 5.7.5 に示すが、各試料の G_{dN}^* と R_{LI5} の関係は最小間隙比で正規化する前と比較してほとんど変化は認められず、拘束圧の違いによる差は依然として残っている。現時点においてこの詳細なメカニズムは明確では無いが、考えられる原因の一つとして、各凍結試料の年代効果の違いが影響している可能性が考えられる。

$$G_{dN}^* = G_N / f(e_{min}) \sigma'_m{}^n \quad [5.4]$$

また、各試料の動的せん断剛性率 G_{d0} と液状化強度 R_{L15} の関係について、高い拘束圧 ($\sigma_{c(thaw)} = 98 \text{ kPa}$) で融解された凍結試料の G_{d0} と R_{L15} で正規化された値を図 5.7.6 に示す。結果より、利根川砂試料と江戸川砂 B 試料については G_{d0} の値が凍結試料の 85 % 程度までは、 R_{L15} の低下は 10 % 程度となっている。一方、江戸川砂 C 試料については、 G_{d0} の値が凍結試料の 70 % までは R_{L15} の低下はそれほど大きくない (低下率 10 % 程度)。本研究では凍結試料の G_{d0} に近い値を示す試料が大半を占めるため一概には言えないが、比較的セメンテーション効果の大きい試料では、 G_{d0} の低下に伴う液状化強度の低下率は小さい可能性が考えられる。

表 5.7.1 各試料の液状化強度と平均初期微小変形特性

地層	試料	Test No.	融解拘束圧 応力履歴等	液状化強度 R_{L15}	平均初期微小変形特性 (MPa)		
					E_{s0}	E_{d0}	G_{d0}
利根川砂	凍結試料	F1,2,4,5,7	98 kPa	0.43	177.0	357.7*	109.6
		F3,6,8	30 kPa	0.37	171.4	320.7*	98.7
	再構成試料	R1,5,11	Without CL	0.17	156.8	301.3*	85.3
		R3,10,13	CL: 10,000	0.43	188.3	329.8* 1166.5	109.9
		R2	CL: 20,000	0.47	-	352*	134.8
		R6,7	F-T 98 kPa	0.43	185.65	329.9*	115.6
		R8,9	F-T 30 kPa	0.40	195.45	806.1	97.4
A	凍結試料	F2,3,4	60 kPa	0.34	51.3	256.2	29.3
		F5	10 kPa	-	43.1	194.5	23.9
B	凍結試料	F1,5	98 kPa	0.40	262.8	1166.0	127.6
		F3,4	30 kPa	0.37	255.1	1078.8	118.3
	再構成試料	R1,2,6	Without CL	0.16	171.5	582.6	91.2
		R7	CL: 10,000	0.36	182.2	687.3	109.5
		R8,10	CL: 20,000	0.38	214.4	614.2	117.1
C	凍結試料	F3,4,6	98 kPa	0.32	375.0	1040.9* 1049.8	320.9
		F2,5	30 kPa	0.30	396.8	756.2* 1247.1	296.2
	再構成試料	R1,6,7	Without CL	0.14	241.7	993.6	158.6
		R2	CL: 10,000	0.28*	360.5	1277.8	218
		R3,8,10	CL: 20,000	0.30	334.6	1161.9	229.6

* : 加速度計取付け方法改良前の実験結果

F-T : Freese-Thaw の略

地層の A, B, C は江戸川砂

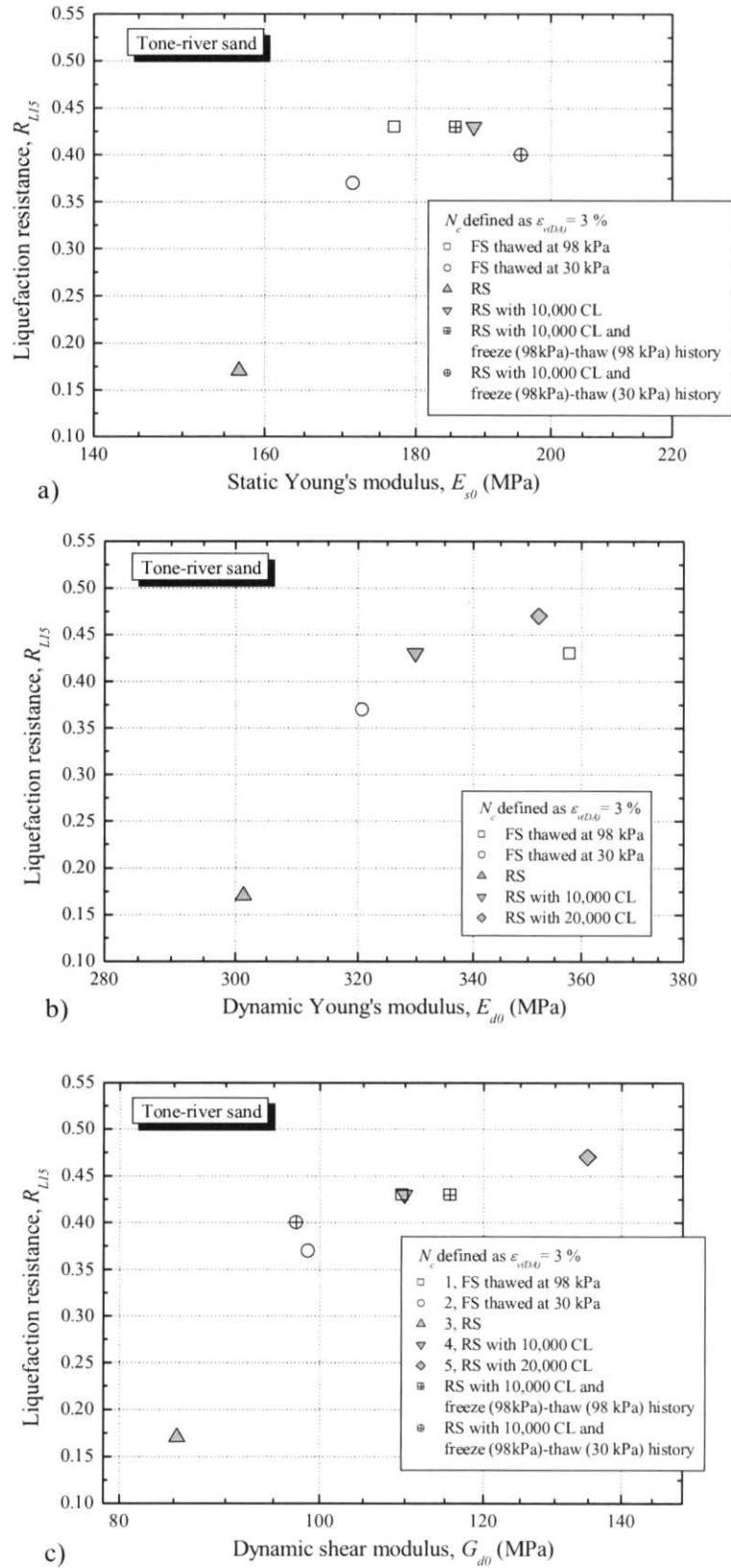
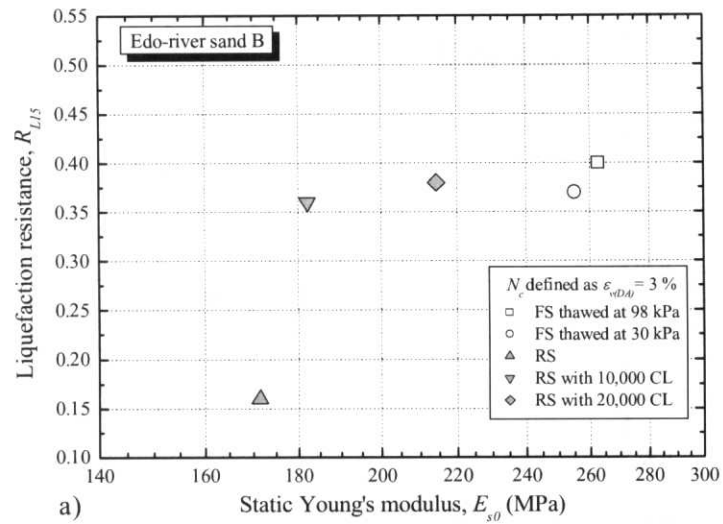
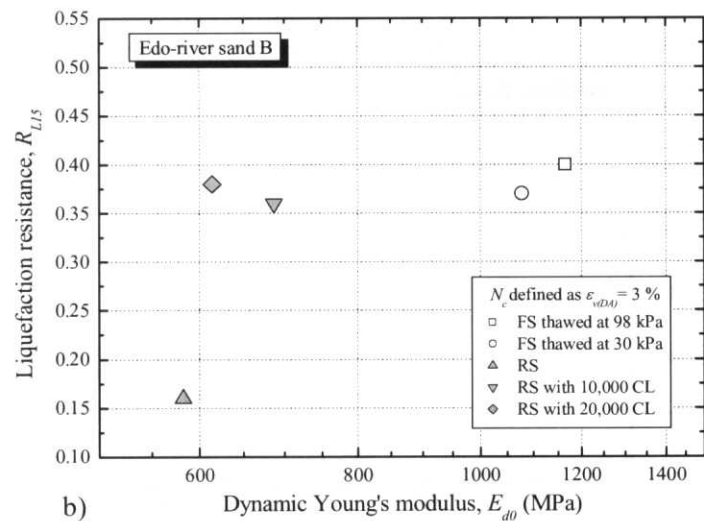


図 5.7.1 利根川砂試料の液状化強度と初期微小変形特性の関係

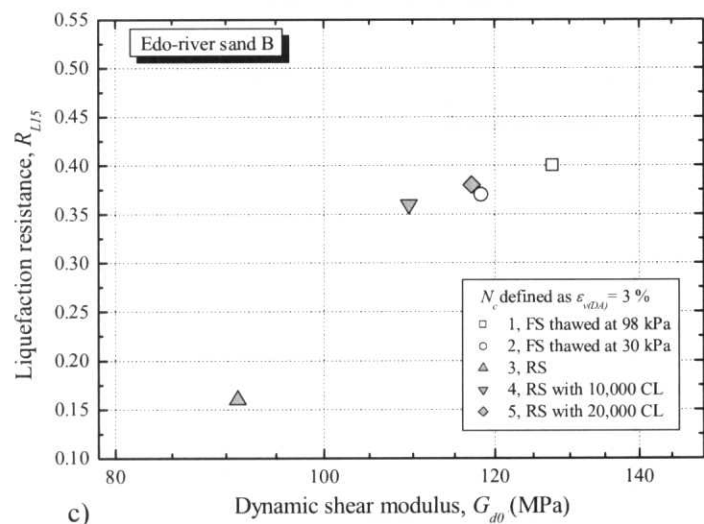
a) E_{s0} , b) E_{d0} , c) G_{d0}



a)



b)



c)

図 5.7.2 江戸川砂 B 試料の液状化強度と初期微小変形特性の関係

a) E_{s0} , b) E_{d0} , c) G_{d0}

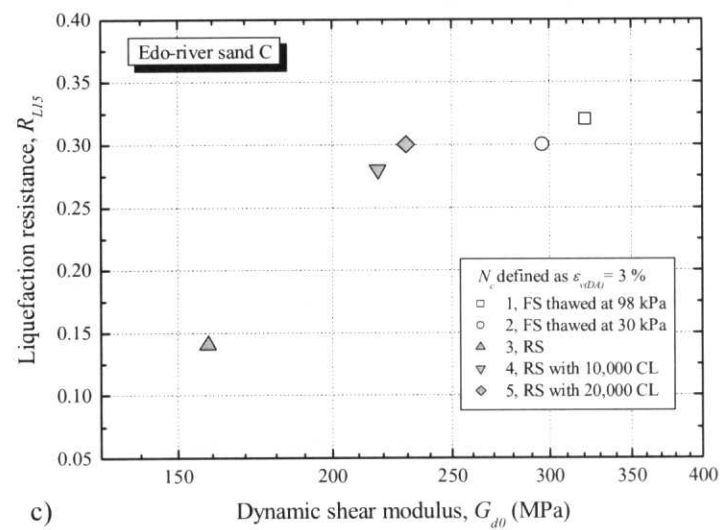
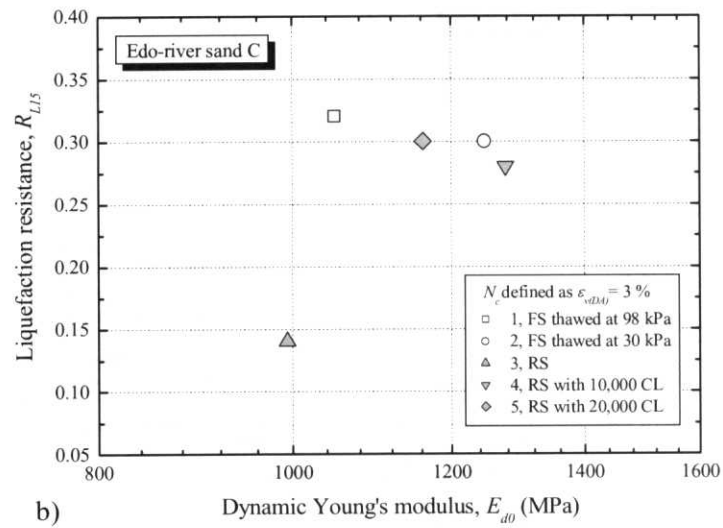
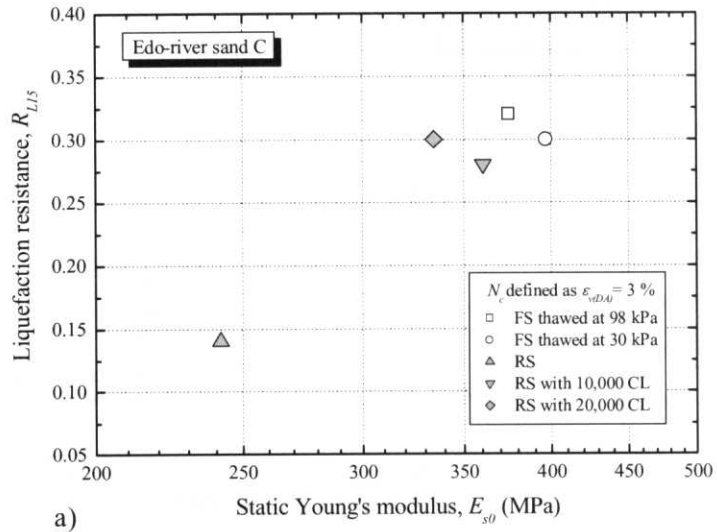


図 5.7.3 江戸川砂 C 試料の液状化強度と初期微小変形特性の関係

a) E_{s0} , b) E_{d0} , c) G_{d0}

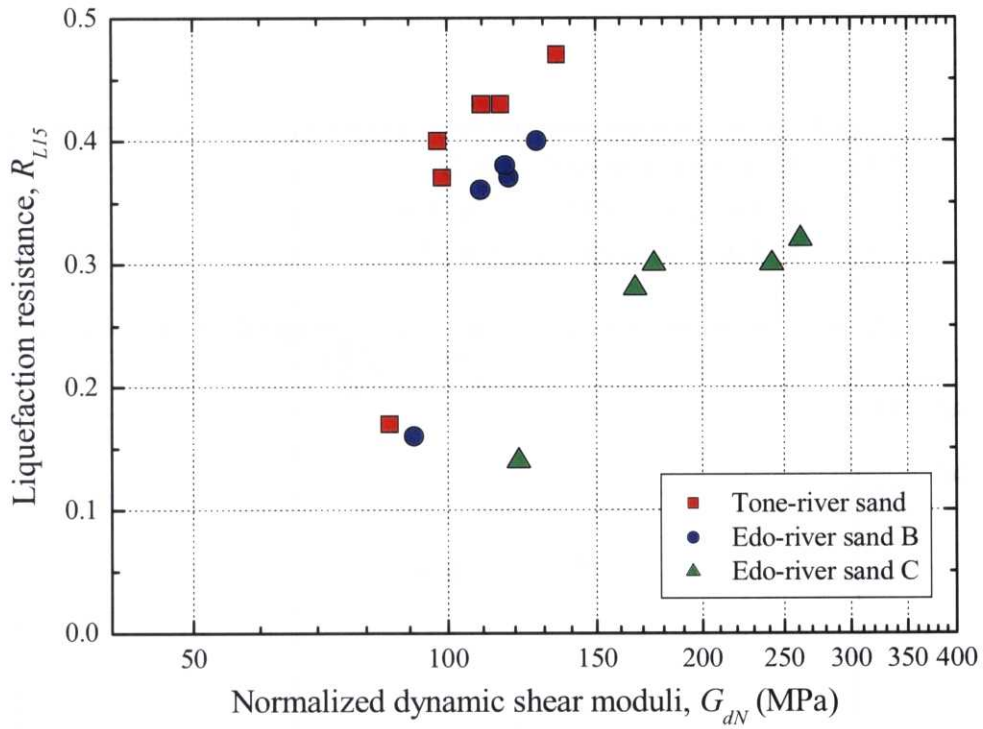


図 5.7.4 各試料の拘束圧依存性を考慮した動的せん断剛性率と液化化強度の関係

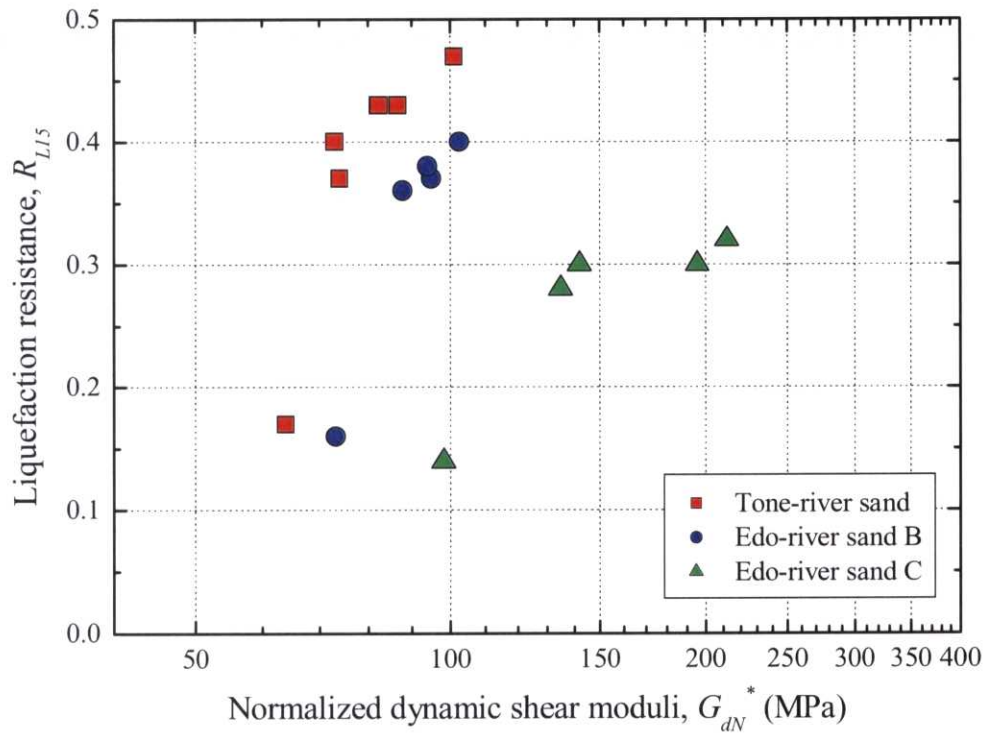


図 5.7.5 各試料の拘束圧依存性と最小間隙比を考慮した動的せん断剛性率と液化化強度の関係

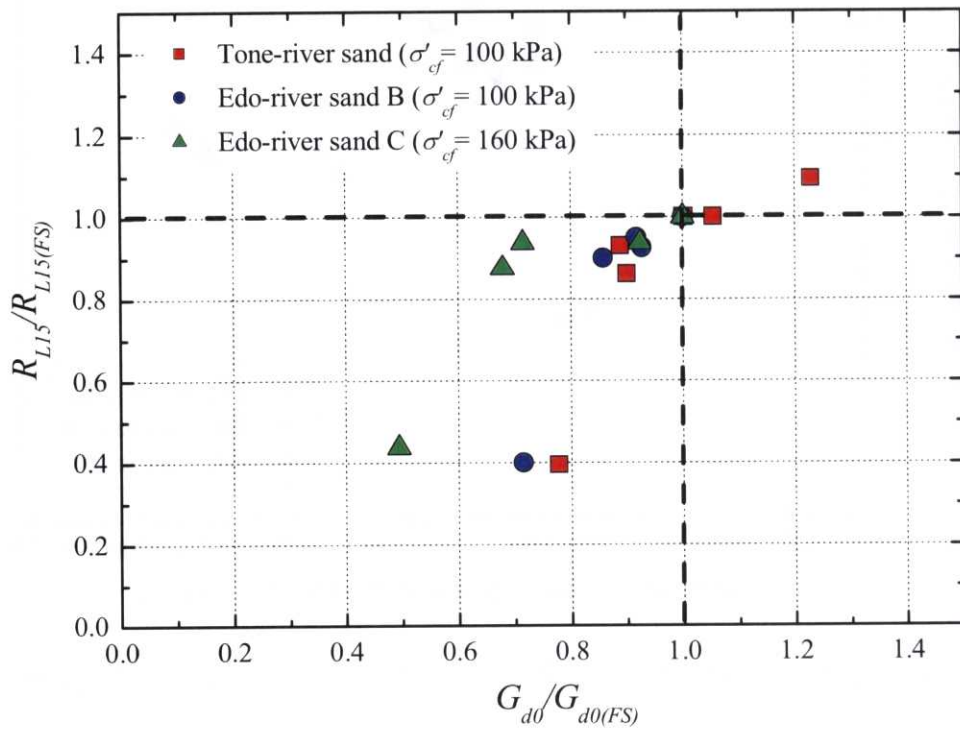


図 5.7.6 各凍結試料の結果で正規化された動的せん断剛性率と液状化強度の関係

5.8 まとめ

本章では、融解拘束圧を変化させた凍結試料、および再構成試料（応力履歴有り、無し）について、微小変形特性と液状化強度特性に関する実験結果を示した。

ここでは、本章の実験結果を基に、主な留意事項を記す。

5.8.1 凍結試料の融解拘束圧が液状化強度に及ぼす影響について

凍結試料を拘束圧 98 kPa、もしくは 30 kPa で融解させた試料の液状化強度 R_{L15} （繰返し回数 $N_c = 15$ の時の所定の軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{v(DA)} = 3\%$ で定義した液状化強度）は、利根川砂試料では約 14 %、江戸川砂 B 試料では約 8 %、江戸川砂 C 試料では約 7 %、後者のほうが前者よりも小さな値を示した。利根川砂試料は沖積層より採取されたものであるため、低拘束圧融解時に生じた急激な応力低下により土粒子の微視的構造が変化した可能性が考えられる。また、繰返し応力履歴を受けた利根川砂試料の再構成試料においても同様の試験を実施したが、融解時拘束圧が 30 kPa の試料は 98 kPa の試料よりも、液状化強度は約 7 % 低下したことを確認した。

一方、江戸川砂 B, C 試料については洪積層であり、土粒子間にセメンテーション等の年代効果が発揮されていたものと考えられ、低拘束圧融解に伴う試料の乱れは比較的小さかったものと推定される。

以上より、凍結採取試料の融解拘束圧は、顕著ではないが液状化強度に影響を及ぼす可能性が考えられる。したがって、融解拘束圧は可能な限り原位置の応力状態に近い値で実施すべきと考える。

5.8.2 凍結試料の液状化強度に及ぼす乱れの評価について

凍結試料の乱れの主要因は凍結時の膨張の影響が支配的であるが、現状において凍結採取された試料の原位置での凍結膨張量を把握することは困難である。本研究では利根川砂再構成試料において凍結・融解試験を実施したが、融解時の体積ひずみは凍結試料の値よりもかなり低い値となったことから、実験における凍結時のひずみも原位置での凍結挙動を表しているとはいえない。また、融解時体積ひずみは凍結膨張ひずみと等しいと仮定して検討することも考えられるが、融解時体積ひずみ融解時拘束圧に依存するため、原地盤の応力状態が不確定である以上、設定条件により値は変化してしまう。

一方、凍結試料の融解時拘束圧の違いが、微小変形特性（特に動的せん断剛性率 G_d ）に影響を及ぼすことを第 4 章において示した。また、本章における実験により、微小変形特性と液状化強度との間には相関があることが確認された。したがって、採取試料の健全性を評価に関し

ては、PS 検層などの原位置試験結果と室内試験による微小変形特性（特に G_d ）との比較により評価する方法が適切であろうと考える。しかし、凍結膨張などによる試料の乱れを室内試験結果に反映させるためには精度の良い計測手法が求められる。例えば、LDTや加速度計のような、実験に伴う誤差（ベディングエラー等）の影響を受けない計測手法を採用することが望ましい。

5.8.3 年代効果が液状化挙動に及ぼす影響について

年代効果が液状化挙動に及ぼす影響に関しては、本研究では液状化前もしくは液状化中の微小変形特性について、堆積年代の異なる凍結試料の実験結果を比較した。沖積層である利根川砂の場合、液状化前の等方圧密時と液状化過程において計測した同じ応力状態における微小変形特性の値は同等もしくは若干低い値であった。一方、洪積層である江戸川砂 B, C 試料でも液状化中の微小変形特性の方が圧密中よりも小さな値となったが、特に低い応力レベルではその差は大きくなった。液状化により試料の有する年代効果が失われていくものと考え、最初から年代効果の大きい洪積層では、圧密中と液状化中の微小変形特性の差は大きくなるものと推定される。第4章では、凍結試料と再構成試料の微小変形特性の比較や一軸圧縮試験により、洪積層は比較的強い年代効果を有していることを示したが、等方圧密時と液状化中の微小変形特性の比較からも、同様の傾向が確認できる。

また、液状化スタート後の有効応力の低下に伴う動的せん断剛性率 G_d の値について、利根川砂試料（沖積層）では、比較的急激に G_d が低下する傾向が確認された。一方、江戸川砂 B, C 試料（洪積層）では、 G_d の低下が緩やかに生じた。これは、沖積層である利根川砂では、年代効果として土粒子構造の安定化が、洪積層である江戸川砂 B, C 試料には更にセメンテーション効果が発揮されていたものと考えられるが、液状化により前者については比較的急激に、後者については緩やかに、その効果が失われていくものと考えられる。これは、洪積層は液状化しにくい原因の一つであると考えられる。

5.8.4 液状化の検討に対する再構成試料の適用性

実務における液状化検討に際し、比較的入手が困難な凍結採取試料の代替として、攪乱試料による再構成試料を用いることができれば、設計コスト削減に寄与できる。しかし、空中落下法や振動法により密度調節した再構成試料では、液状化強度 R_{L15} について比較した場合、凍結試料の約半分の値となる。一方、利根川砂再構成試料の場合、10,000 回の繰返し載荷履歴を与えることで、凍結試料と R_{L15} と微小変形特性を得ることができた。また、液状化応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c=0.40$ における凍結試料と再構成試料の繰返し回数と軸ひずみ両振幅の関係、および繰返し回数

と間隙水圧比の関係は、比較的似た挙動であった。江戸川砂 B, C 試料では、繰返し載荷履歴を 20,000 回与えても凍結試料と同等の R_{L15} を得ることはできなかったが、その値は応力履歴を受けない再構成試料と比較して顕著に大きくなった。このように液状化強度が応力履歴の影響を受ける傾向は、これまでの研究 (e.g., Tokimatsu & Hosaka, 1986) でも確認されている。

上記の従来傾向に加え、本研究では液状化中の微小変形特性について、凍結試料と応力履歴を受けた再構成試料との比較を実施した。応力履歴を受けた再構成試料では、液状化スタート後に G_d の値が急に低下する傾向を呈するが、このような挙動は、利根川砂凍結試料 (沖積層) の結果と比較的良く整合した。一方、液状化スタート時における G_d の低下が緩やかに生じる江戸川砂 B, C 試料においては、繰返し応力履歴を受けた再構成試料ではその挙動を適切に表現できないことを示した。

以上より、セメンテーション効果が小さい沖積層では、繰返し載荷履歴により凍結採取試料と同等の微小変形特性を有する再構成試料を用いることで、凍結試料に準ずる液状化挙動を室内試験により再現できることを示した。また、実務においては PS 検層による動的せん断剛性率 G_d をターゲットにした方法 (e.g., Tokimatsu, 1988) も有用であろう。しかし、再構成試料の作成手法により試料の初期異方性が変化し、液状化強度が変化することは多数報告されていることから (e.g., 砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会, 1985)、再構成試料の作成手法によっては、応力履歴と液状化強度および微小変形特性の関係が変化する可能性は十分考えられる。

洪積層では繰返し載荷履歴により凍結試料と同等の微小変形特性を再構成試料に与えられたとしても、凍結試料と同等の挙動を再現することは難しい。このようなセメンテーションの影響を考慮するためには、繰返し載荷履歴だけでなく何らかの膠着物質 (例えばセメント、石灰等) を再構成試料に付与させる必要があると考える。

《参考文献》

- 1) Goto, S., Shamoto, Y. and Tamaoki, K. (1987): Dynamic properties of undisturbed gravel sample by the in-situ frozen, *Proc. of 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, 233-236.
- 2) Goto, S., Suzuki, Y., Nishio, S. and Oh-oka, H. (1992): Mechanical properties of undisturbed Tone-river gravel obtained by in-situ freezing method, *Soils and Foundations*, **32** (3), 15-25.
- 3) Goto, S. (1993): Influence of freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils, *Soils and Foundations*, **33** (4), 148-158.
- 4) 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.
- 5) Hatanaka, M., Sugimoto, M. and Suzuki, Y. (1985): Liquefaction resistance of two alluvial volcanic soils sampled by in situ freezing, *Soils and Foundations*, **25** (3), 49-63.
- 6) Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki, T. And Endo, M. (1988): Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed Tokyo gravel, *Soils and Foundations*, **28** (4), 57-68.
- 7) Imai, T. and Tonouchi, K. (1982): Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus, *Proc. 2nd European Symp. on Penetration Testing*, 67-72.
- 8) Koseki, J., Hamaya, S., Tatsuoka, F. and Maeshiro, N. (1998): Elastoplastic deformation characteristics of Toyoura sand during liquefaction, *Geotechnical Engineering and Soil Dynamics III*, Geotechnical Special Publication No.75, ASCE, Vol.1, 385-397.
- 9) Koseki, J., Kawasaki, S., Nagayama, H., Sato, T., Hayano, K. and Torimitsu, M. (1999 a): Liquefaction tests of Toyoura sand measuring change of quasi-elastic deformation properties, *Bull. ERS*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, No.32, 47-60.
- 10) Koseki, J., Sato, T., Maeshiro, N. and Urano, I. (1999 b): Elastic deformation properties of sands containing fines during liquefaction, *Proc. of International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction*, 121-132.
- 11) Koseki, J., Kawakami, S., Nagayama, H. and Sato, T. (2000): Change of small strain quasi-elastic deformation properties during undrained cyclic torsional shear and triaxial tests of Toyoura sand, *Soils and Foundations*, **40** (3), 101-110.
- 12) 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.

- 13) Munson, P.J., Obermeier, S.F., Munson, C.A. and Hajic, M.R. (1997): Liquefaction evidence for Holocene and latest Pleistocene seismicity in the southern halves of Indiana and Illinois – a preliminary overview, *Seismological Research Letters*, **68**(4), 521-536.
- 14) Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R. (1972): Sand and sandstone, *Springer-Verlag*, Berlin, 214-227.
- 15) 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.
- 16) Singh, S., Seed, H.B. and Chan, C.K. (1982): Undisturbed sampling of saturated sand by freezing, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *Proc. of ASCE*, Vol.108, GT2, 247-268.
- 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., Kato, H., Kimura, M. And Pradhan, T.B.S. (1988): Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure, *Soils and Foundations*, **28**(1), 119-131.
- 19) Tatsuoka, F., Yasuda, S., Iwasaki, T. and Tokida, K. (1980): Normalized dynamic undrained strength of sands subjected to cyclic and random loading, *Soils and Foundations*, **20** (3), 1-16.
- 20) Tokimatsu, K. (1988): Penetration tests for dynamic problems, Penetration Testing 1988, *Proc. Int. Symp. on Penetration Testing*, Balkema, 117-136.
- 21) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. (1986): Effects of sample disturbance on dynamic properties of sand, *Soils and Foundations*, **26** (1), 53-64.
- 22) Tokimatsu, K. and Uchida, A. (1990): Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity, *Soils and Foundations*, **30** (2), 33-42.
- 23) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y. (1986): Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli, *Soils and Foundations*, **26** (1), 25-35.
- 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) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. (1989): Evaluation of liquefaction resistance of clean sands based on high-quality undisturbed samples, *Soils and Foundations*, **29** (1), 93-104.
- 27) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makihara, Y. (1984): Undrained cyclic shear strength of a dense Niigata sand, *Soils and Foundations*, **24** (4), 131-145.
- 28) 東拓生, 田村敬一, 二宮嘉朗 (1996): 地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化判定法に

- 関する研究, *土木学会第51回年次学術講演会講演概要集*, III-A, 196-197.
- 29) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進 (1978): 砂質地盤の液状化時流動化の簡易判定と適用例, *第5回日本地震工学シンポジウム発表論文集*, 641-647.
 - 30) 浦野泉 (1997): 原位置採取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.
 - 31) 佐藤剛司, 永山浩, 川上定弘, 古関潤一 (1999): 豊浦砂の非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回年次学術講演会III*, 136-137.
 - 32) 社団法人日本道路協会 (1990): 道路橋示方書 V. 耐震設計編.
 - 33) 社団法人日本道路協会 (1996): 道路橋示方書 V. 耐震設計編
 - 34) 社団法人日本道路協会 (2002): 道路橋示方書 V. 耐震設計編
 - 35) 砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会 (委員長 土岐祥介) (1985): 豊浦砂の繰返し非排水三軸試験における変形特性に影響を及ぼす諸要因 (委員会中間報告), *土と基礎*, **33**(1), 93-101.
 - 36) 龍岡文夫, 石原雅規, 内村太郎 (1999): 直交異方重擬似弾性モデルとその諸性質, *第34回地盤工学研究発表会講演集*, 369-370.
 - 37) 時松孝次, 鈴木康嗣 (1996): 液状化の判定方法と実際の現象, *基礎工*, **24** (11), 36-41.
 - 38) 松尾修 (2004): 道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, *土木学会論文集*, No.757/III-66, 1-20.
 - 39) 松尾修, 東拓生 (1997): 液状化の判定法, *土木技術資料*, **39** (2), 20-25.
 - 40) 松尾修, 村田健司 (1997): 砂質土の試料採取法による液状化抵抗の違い, *第32回地盤工学研究発表会講演集*, 711-712.
 - 41) 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.
 - 42) 森伸一郎, 沼田淳紀 (1998): 東京層砂層の液状化強度に関する一考察, *土木学会論文集*, No.589/III-42, 141-154.
 - 43) 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.