

第 1 章 序章

1-1 はじめに

我が国は今までに数多くの地震を経験し、その被害も様々である。中でも地盤の液状化による被害は甚大である。液状化が構造物に対して被害を及ぼす大きな原因となる現象であることが初めて認識されたのは、1964 年新潟地震によってである。この地震では、構造物本体にはほとんど異常が見られないにも拘らず、周辺地盤が著しく沈下あるいは傾斜するという被害が発生した。この原因として、地盤が一時的に非常にせん断抵抗の小さい状態となったためと判断された。また、橋梁、地下埋設物、盛土構造物などにおいても、砂質土が一次的にせん断抵抗を失ったことによって生じたものと考えられる被害が発生した。これらの事例とその考察から、砂質土地盤が液状化したものと判断されたのである。

液状化とは、地盤内に地震による繰返しせん断力が作用することにより、間隙水圧が上昇し、それに伴い有効応力が低下して、土粒子が間隙水の中に浮いた状態になる現象である。抵抗力が減る点のみをみれば、普通の材料の破壊とあまり違いはないが、液状化は有効応力低下に伴う破壊という土に固有の現象である。つまり、構造物を支えるはずの地盤が液状化すると、地盤の支持力が低下することにより、構造物は様々な被害を受けるのである。そして、液状化は長柱の座屈などと同じような破局的現象としても重要な工学的意義を持つものである。

最近の地震について例を挙げてみよう。2004 年新潟県中越地震では、小千谷市や長岡市などで強い振動により地盤の液状化が起こり、周辺道路においてマンホールのコンクリート配管の浮き上がり現象が発生し、最大で 1.5 メートル程度地表に浮き上がるという被害が確認されている。また、2005 年福岡県西方沖地震では、博多湾の沿岸域を中心として、埋立地に集中して液状化が起こり、海の中道海浜公園内の「光と風の広場」においては液状化に起因して地盤が流動し、流動量が 10m 程度に及ぶ被害が確認されている。

新潟地震以来、液状化の予測や対策に関するさまざまな研究がなされており、数多くの液状化対策工法が実用化されてきている。現状ではさらに手軽かつ安価に施工が可能な液状化対策工法、既存構造物に対する液状化対策工法の開発が期待されている。その有効な対策工法の一つとして、過圧密を利用した工法がある。これは、載荷盛土や地下水位低下等により施すことができるため、比較的低コストな工法といえる。しかし、過圧密工法が地盤に適用される際の液状化強度に与える効果、すなわち過圧密効果、長期間圧密された地盤における過圧密効果等についてはまだ十分に明らかにされていないと考えられる。また実施工において、載荷盛土工法は、他の工法に比べて長大な日数を必要とすることから時間の有効活用が問題とされるとともに、地下水位低下工法は、永久的に地下水位を低下させたままにすると経済面からも周囲への公害という面からも問題となるため、地下水位低下を施す時間も考慮すべき問題である。

そこで本研究では、過圧密履歴を実際の地盤に与えるための工法のうち、現状で最も施工されている載荷盛土工法と地下水位低下工法の 2 種類の工法に着目し、二重セル型中空ねじり試験装置によってこれら 2 種類の工法を単独および組み合わせて地盤に適用した場合を想定して、 K_0 応力条件下で過圧密履歴を受けた砂質土の液状化強度特性について検討する。また、過圧密

過程において最大有効応力を長期間受けたときの過圧密効果、および長期間堆積している地盤に対する過圧密効果を検討するため、長期圧密された砂の液状化強度特性とそれに及ぼす過圧密効果についても検討を行う。なお、過圧密履歴において載荷盛土工法を軸圧制御、地下水位低下工法を背圧制御で再現している。

1-2 過圧密履歴が液状化強度に与える影響についての既往の研究

1-2-1 山下、土岐、三浦の研究(1990)

試料はトリプルチューブサンプリング法によって採取した深度の異なる 3 種類の不攪乱試料である。試料の物理特性を表 1-1 に示す。

この試験ケース一覧を表 1-2 に示す。過圧密履歴は、原位置での有効土被り圧よりも低い拘束圧で圧密する方法と、原位置での有効土被り圧よりも 2~4 倍程度高い拘束圧で圧密した後、有効土被り圧と等しい拘束圧まで除荷する方法の 2 種類で与えている。用いた試験装置は繰返し三軸試験装置で、載荷周波数は $f=0.1\text{Hz}$ である。

この研究ではまず、原位置で受けた過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を調べている。繰返し応力比と $DA=5\%$ に至るまでの繰返し回数の関係を図 1-1、図 1-2 に示す。これらの図より 2 種類の試料において、原位置での有効土被り圧と等しい拘束圧の下で試験を行った正規圧密状態の液状化強度に比べ、拘束圧が低いほど液状化強度は高くなっていることが確認できる。試験時および原位置での有効拘束圧から過圧密比を推定すると、表 1-2 に示した値となり、このような傾向を示しているのは過圧密履歴によって液状化強度が増加したからと考察されている。

次に、室内で与えた短時間の過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響について調べている。ここでも原位置で受けた過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を調べる実験で用いた試料と同様の試料について、過圧密を 1 時間与え、原位置での有効土被り圧と等しい拘束圧の下で試験を行っている。繰返し応力比と $DA=5\%$ に至るまでの繰返し回数の関係を図 1-3 に示す。この図より、過圧密履歴を与えることにより液状化強度が増加していることが分かるが、過圧密比 2、4 で液状化強度にあまり差が認められていない。

さらに、室内と原位置で受けた過圧密履歴が液状化強度に及ぼす影響を検討するために、液状化強度増加率 R_s と過圧密比の関係を調べている。図 1-4、図 1-5 に示すように、室内での短時間の過圧密履歴に比べ、原位置での長時間の圧密履歴による方が同じ過圧密比であっても液状化強度増加率が大きいことが分かる。また室内での短時間の過圧密履歴を与えた場合の、再構成供試体と不攪乱供試体の液状化強度増加率と過圧密比の関係を比較すると、不攪乱供試体に過圧密履歴を与えた場合よりも再構成供試体の方が液状化強度増加率は高くなっている。これは、同じ過圧密履歴を与えても、過圧密履歴を与える前の圧密時間が長い方が、過圧密履歴のみによる液状化強度増加は小さいことを示している。したがって不攪乱供試体は原位置で長時間圧密履歴を受けているために、再構成供試体に同一の過圧密履歴を与えた場合よりも増加率が小さくなったと考察されている。

1-2-2 山崎、善、加賀谷の研究(1992)

試料には、新潟東港で採取した砂質土を用いている。その粒度・物理特性を表 1-3 と図 1-6 に示す。供試体は、水中落下法により作成したもので、寸法は高さ $H=12\text{cm}$ 、直径 $\Phi=5\text{cm}$ であ

表 1-1 試料の物理特性、採取深度(山下ら、1990)

試料名	採取深度 (m)	有効土被り圧 (kgf/cm ²)	D ₅₀ (mm)	U _c	F _c (%) ≦75μm	$\overline{\gamma}_{dmax}$ (gf/cm ³)	$\overline{\gamma}_{dmin}$ (gf/cm ³)	\overline{D}_{r0} (%)
I-1	8.3~10.0	1.25	0.27	1.9	0.8	1.433	1.131	77
I-2	13.3~15.0	1.7	0.13	1.8	8.3	1.508	1.155	92
I-3	17.3~19.2	2.1	0.12	1.8	12.7	1.493	1.123	100

表 1-2 試験ケース一覧(山下ら、1990)

試料名	供試体	試験法	σ _c (kgf/cm ²)	過圧密比
I-1	不攪乱	繰返し三軸	1.25	1
		中空ねじり	1.25	1
I-2	不攪乱	繰返し三軸	0.6	2.83 *
			1.3	1.31 *
			1.7	1, 2, 4
		中空ねじり	1.7	1
	再構成	繰返し三軸	0.6	1
			1.7	1, 2, 4
		中空ねじり	1.7	1, 2, 4
I-3	不攪乱	繰返し三軸	0.6	3.5 *
			1.7	1.24 *
			2.1	1, 2, 3.8
	再構成	繰返し三軸	0.6	1

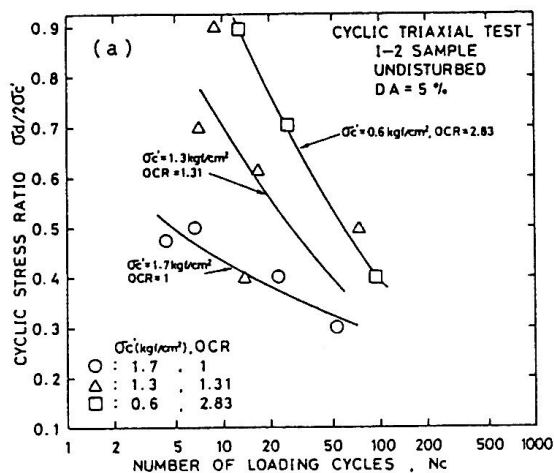


図 1-1 繰返し応力比と繰返し回数の関係
(山下ら、1990)

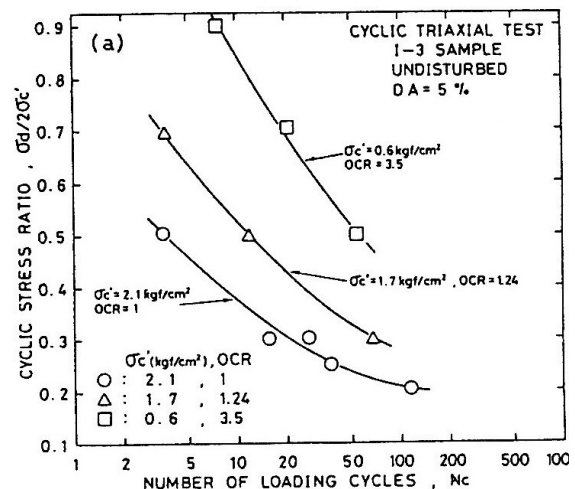


図 1-2 繰返し応力比と繰返し回数の関係
(山下ら、1990)

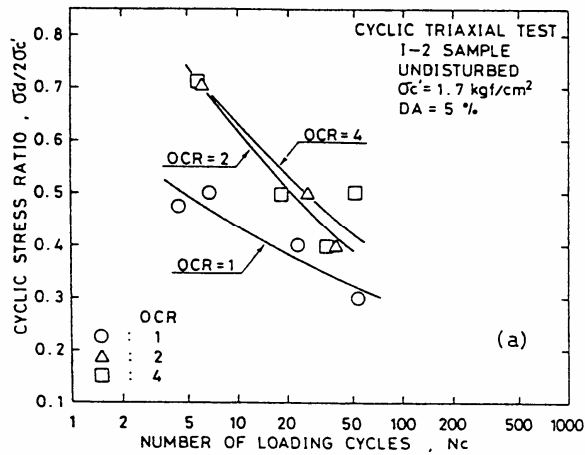


図 1-3 繰返し応力比と繰返し回数の関係
(山下ら、1990)

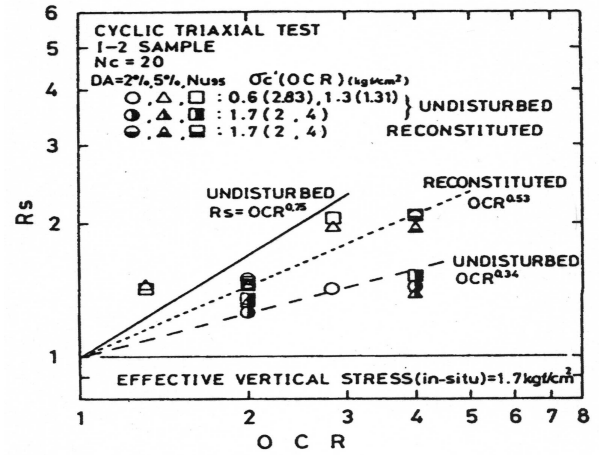


図 1-4 液状化強度増加率と過圧密比の関係
(山下ら、1990)

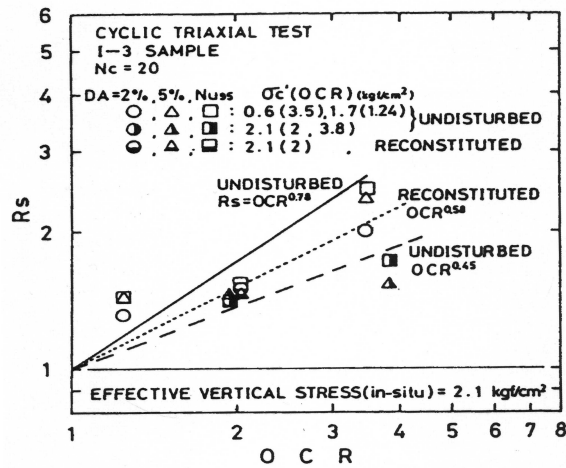


図 1-5 液状化強度増加率と過圧密比の関係
(山下ら、1990)

表 1-3 新潟東港砂の物理特性
(山崎ら、1992)

ρ_s (g/cm ³)	2.707
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.662
ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.293
U_c	2.15
D_{50} (mm)	0.24

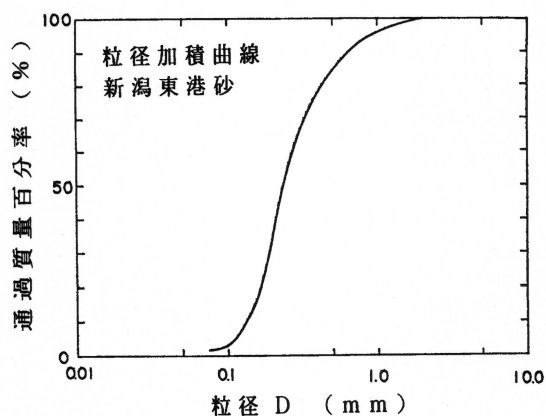


図 1-6 新潟東港砂の粒度特性
(山崎ら、1992)

る。相対密度は $Dr=50\%$ 、 80% である。

過圧密履歴は、有効拘束圧 σ'_c を 1.0kgf/cm^2 とし、過圧密比(OCR) を 2.0 に設定して、圧密等方圧力を载荷、除荷することにより与えている。圧密終了後、周波数 0.1Hz の正弦波で繰返し三軸試験を行っている。

繰返しせん断応力比 τ/σ'_c と液状化(両振幅軸ひずみが 5% になった状態)に至るまでの繰返し回数 N_c の関係を、中詰め砂について図 1-7、密詰め砂について図 1-8 に示す。これらの図より、正規圧密の場合に比べて過圧密にすることにより液状化強度がかなり大きくなることが分かる。また、◆プロットは過圧密履歴を 5 回繰返し与えた場合の結果を示したものであるが、過圧密比が同一であれば液状化強度は、その繰返しの影響を受けないと結論づけられている。

次に、相対密度 Dr_0 と繰返しせん断応力比(液状化強度比) $\tau/\sigma'_c(N_c=20)$ の関係を図 1-9 に表している。この図より、正規圧密供試体と過圧密供試体の液状化強度比は相対密度が同一であっても異なった値になり、液状化強度比は相対密度に関して一意的に定まらない。つまり、過圧密による液状化強度の変化は相対密度の変化では説明できないことが明らかになっている。

1-2-3 永瀬、宍道、辻野、木村の研究(1994)

試料は、千葉県習志野市の沖積砂層より採取した不攪乱試料と兵庫県神戸市ポートアイランド内より採取した不攪乱試料の 2 種類である。試料の物理特性および粒径加積曲線を図 1-10 に示す。

供試体は、高さ $H=15\text{cm}$ 、直径 $\Phi=7.5\text{cm}$ (習志野沖積砂の供試体は有効拘束圧 $\sigma'_0=0.5\text{kgf/cm}^2$ のとき、時高さ $H=10\text{cm}$ 、直径 $\Phi=5.0\text{cm}$) の円柱形とし、二酸化炭素と脱気水により飽和させている。繰返し载荷時の初期有効拘束圧は $\sigma'_0=0.5$ 、 1.0kgf/cm^2 としている。

過圧密履歴の与え方は、初期有効拘束圧で等方圧密した後所定の過圧密比(OCR)=1、2、4 に対応する等方応力で圧密し、圧密終了後、等方的に初期有効拘束圧まで下げる方法である。

繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_0$ と両振幅ひずみ $DA=5\%$ に至るまでの繰返し回数の関係を図 1-11(A)(B)に示す。これらの図より、2 種類の不攪乱試料において過圧密履歴による液状化強度の増加が確認できる。ここで、過圧密履歴による液状化強度増加率 R_{oc} を次式で定義する。

$$\text{過圧密による液状化強度増加率 } R_{oc} = \frac{\text{過圧密した供試体の液状化強度比}}{\text{正規圧密した供試体の液状化強度比}}$$

この液状化強度増加率 R_{oc} と過圧密比(OCR)の関係を図 1-12(A)(B) に示す。この図より、近似曲線 $R_{oc}=(OCR)^n$ の n の値は $0.40\sim 0.45$ となり試料による明確な差は認められない。また、過圧密履歴時の排水量 ΔV_{oc} と正規圧密後の供試体体積 V_c から過圧密履歴体積歪み $\Delta V_{oc}/V_c$ を定義し、液状化強度増加率との関係を図 1-13(A)(B)に示す。これらの図より過圧密履歴によって生じる体積変化により液状化強度が増加していることが分かる。この過圧密履歴体積歪みが液状化強度の増加を大きくした要因の一つであると指摘されている。

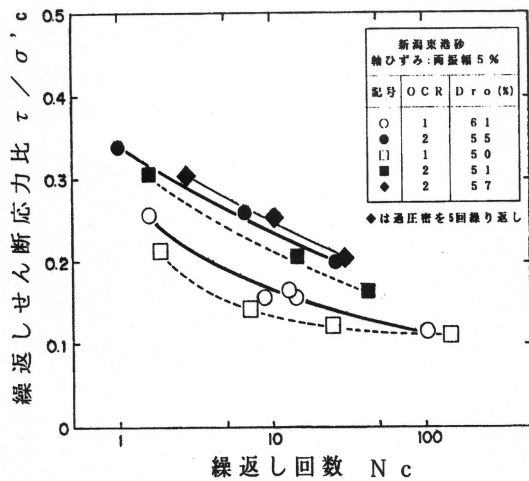


図 1-7 中詰め砂の試験結果(山崎ら、1992)

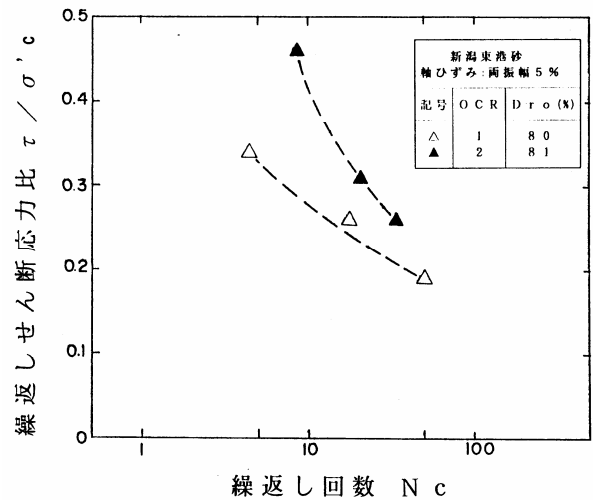


図 1-8 密詰め砂の試験結果(山崎ら、1992)

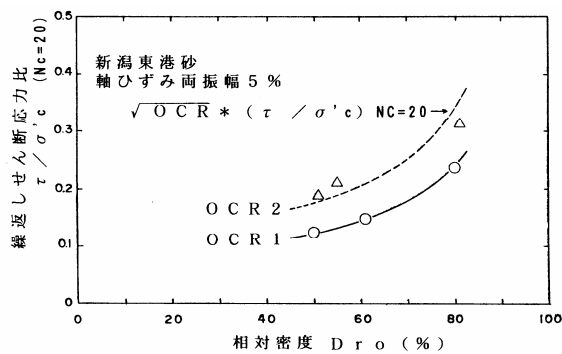


図 1-9 相対密度と液状化強度の関係
(山崎ら、1992)

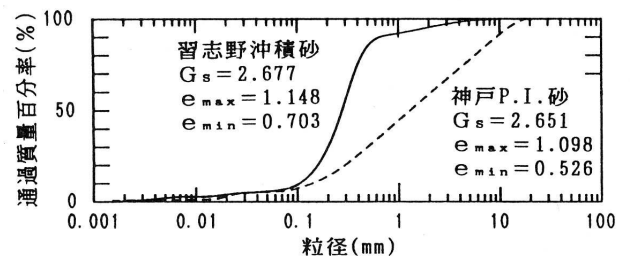


図 1-10 粒径加積曲線(永瀬ら、1994)

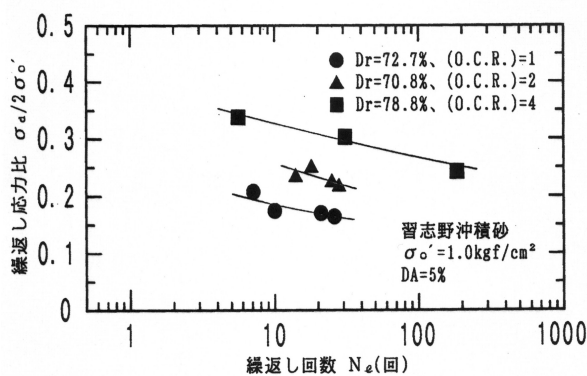


図 1-11(A) 繰返し応力比と繰返し回数の関係
(永瀬ら、1994)

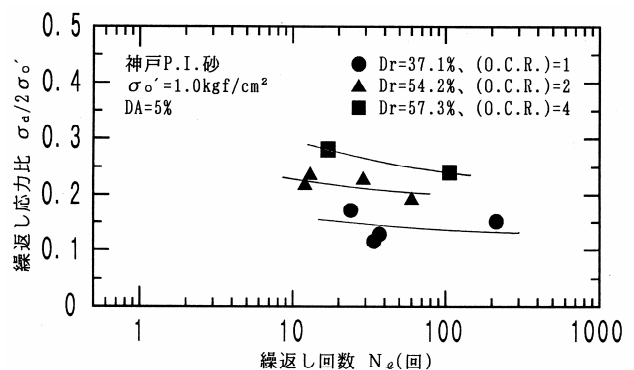


図-8.4 $\sigma_a / 2\sigma'_c \sim N_e$ の関係

図 1-11(B) 繰返し応力比と繰返し回数の関係
(永瀬ら、1994)

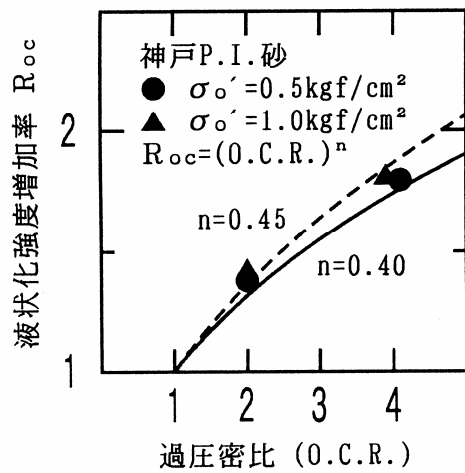


図 1-12(A) 液状化強度増加率と過圧密比の関係 (永瀬ら、1994)

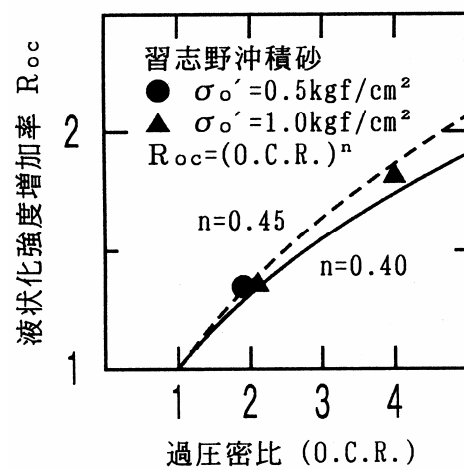


図 1-12(B) 液状化強度増加率と過圧密比の関係 (永瀬ら、1994)

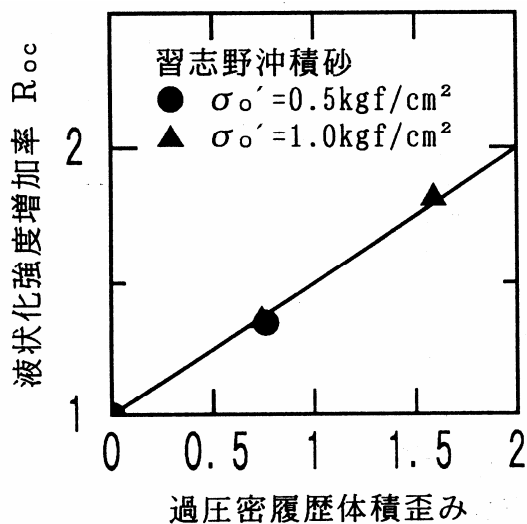


図 1-13(A) 液状化強度増加率と過圧密履歴体積歪みの関係 (永瀬ら、1994)

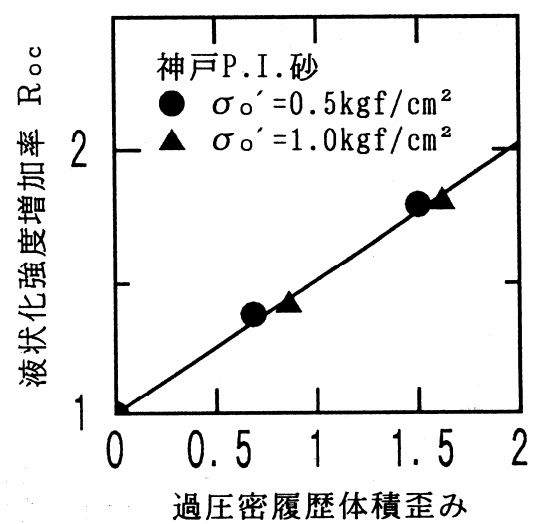


図 1-13(B) 液状化強度増加率と過圧密履歴体積歪みの関係 (永瀬ら、1994)

1-2-4 森、風間、北詰、福島、峰の研究(2001)

試料には、常陸那珂火力発電所埋立土より採取したものを用いている。供試体は空中落下法で作製し、直径 50mm、高さ 100mm の円筒供試体としている。この実験では圧密、除荷、再圧密履歴が、液状化抵抗にどのような影響を与えるのかを詳細に調べるために、圧密条件や過圧密比を表 1-4 のように変化させて実験を行っている。また、圧密中、除荷中は、全過程で K_0 状態としている。繰返しせん断を与える際の初期有効鉛直応力は 98kPa で一定とし、過圧密比は 1.0、2.0、3.0 の 3 通りとしている。また、過圧密比 2.0 のものに関しては、一旦、初期有効鉛直応力よりも小さい応力まで除荷した後、初期有効鉛直応力まで再圧密している。せん断方法は、ひずみ漸増型繰返しせん断とし、入力波は三角波、軸ひずみ速度は 0.1%/sec とし、軸ひずみ片振幅 0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.6%、3.2%、6.4%の三角波を順次各 1 波ずつ入力している。

図 1-14 は有効鉛直応力と側圧係数との関係を示している。Case4、Case5 のように通常の過圧密を行った場合、側圧係数は過圧密比と共に大きくなるが、Case2、Case3 のように除荷・再圧密を行ったときは、除荷の程度によって初期有効鉛直応力まで再圧密したときの側圧係数が減少している。

図 1-15 は、軸ひずみ片振幅 0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.6%、3.2%、6.4%の各 1 波ごとに蓄積される累積損失エネルギーを初期平均有効主応力で除し、正規圧密の累積損失エネルギーとの比で表したものである。この図から、軸ひずみ片振幅 0.1%程度のひずみレベルでは、過圧密の効果はほとんど発揮されないことが分かる。軸ひずみ片振幅が 0.2%~1.6%程度のひずみレベルにおいては、過圧密の効果が発揮されているが、Case2、Case3、Case4 の条件は、密度が同程度、過圧密比は 2.0 で、圧密・除荷履歴だけが異なる。しかし、Case2、Case3 の各 1 波の間に蓄積されるエネルギー量はほとんど同じだが、Case4 の各 1 波の間に蓄積されるエネルギー量は Case2、Case3 よりもかなり大きい。Case2、Case3 のように、一旦、初期有効鉛直応力よりも小さな応力まで除荷した後に再圧密した供試体は、Case4 のような通常の過圧密の供試体よりも液状化抵抗が減少している。そして、その液状化抵抗の減少の度合いは、Case2 と Case3 では変化がなく、9.8kPa まで除荷したものの、49kPa まで除荷したものの、液状化抵抗には差がないことがわかる。

したがって、過圧密工法によって液状化抵抗の増加を期待する場合は、大きなひずみを受ける場合や除荷履歴がある場合に注意する必要がある、また、一度液状化して有効応力が低下している場合には、過圧密の効果は期待できないものと考えてよいと指摘している。

1-2-5 澤田、桜庭、大向、三上の研究 (2001)

試料には、東京湾内の埋立地内から採取した砂質土を使用している。図 1-16 に土質柱状および標準貫入試験により得られた N 値の深度分布、図 1-17 に試料の粒径加積曲線を示す。 K_0 値をフラット・ディラトメータ(DMT)とセルフボーリング型の横方向載荷試験(SBLLT)の二つの原位置試験により測定し、図 1-16 に示しており、2 深度において K_0 値を評価した結果、概ね

表 1-4 実験条件(森、風間ら、2001)

Case No.	OCR	Consolidation history (σ_v' : kPa)
Case-1	1.0	0→98
Case-2	2.0	0→98→196→9.8→98
Case-3	2.0	0→98→196→49→98
Case-4	2.0	0→98→196→98
Case-5	3.0	0→98→196→294→98

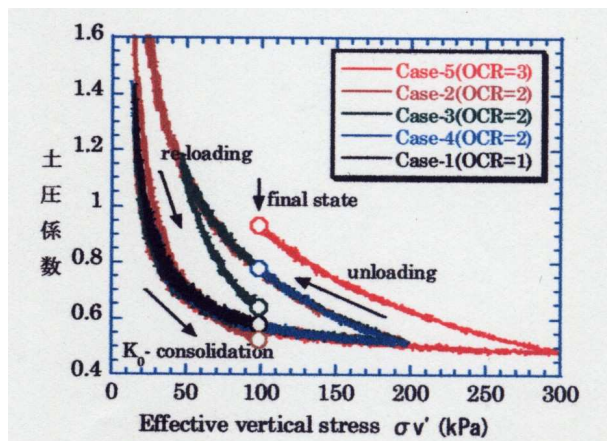


図 1-14 K_0 圧密中の側圧係数の変化
(森、風間ら、2001)

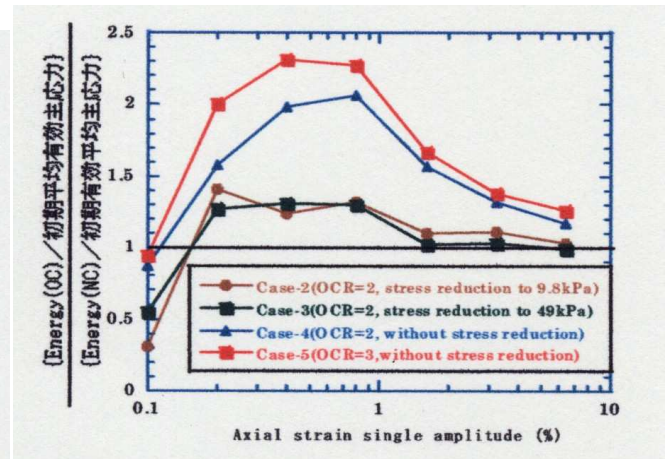


図 1-15 1 波毎の正規化累積損失エネルギー
(森、風間ら、2001)

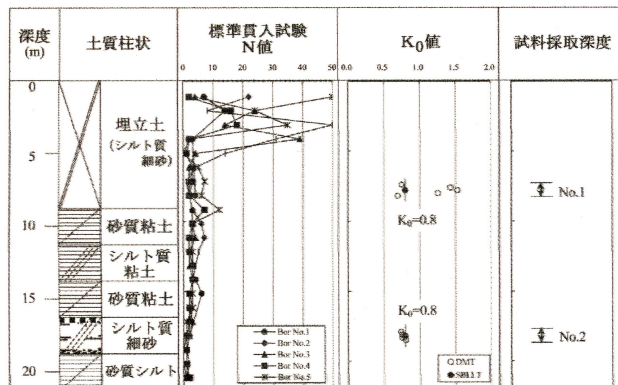


図 1-16 原位置試験・試料採取位置の土質構成

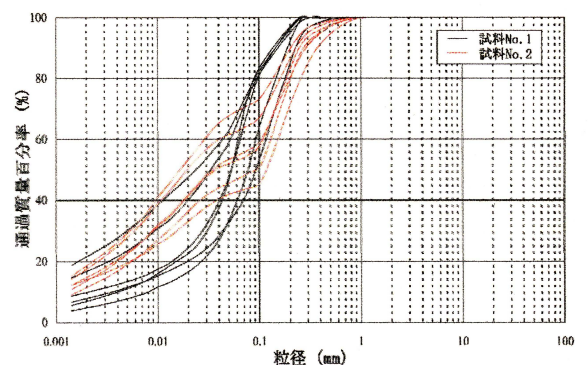


図 1-17 原位置試験・試料採取位置付近の
粒径加積曲線

0.8 であり、この値を室内土質試験に反映している。

室内土質試験では、 K_0 値を評価した 2 深度において採取した不攪乱試料を用いて、次に示す 3 種類の応力条件で試験を実施している。

A：等方圧密条件での繰返しねじりせん断試験(軸変位自由、 $K_0=1.0$)

B： K_0 圧密条件での繰返しねじりせん断試験(軸変位固定、 $K_0=0.8$)

C：等方圧密条件での繰返し三軸試験($K_0=1.0$)

いずれの条件においても次式に示す初期平均有効主応力 σ_{m0}' は同じとして、軸方向応力 σ_a' 、側方向応力 σ_r' を設定し、繰返し載荷波形は 0.1Hz の sin 波とし、繰返しせん断応力 $\tau_d (= \sigma_d'/2)$ を各応力状態とも 2 種類設定している。

$$\sigma_{m0}' = \frac{\sigma_a' + 2\sigma_r'}{3} = \frac{(1 + 2K_0)\sigma_a'}{3}$$

図 1-18、1-19 に同一平均有効拘束圧で動的載荷時の応力状態が異なる試験結果を比較して示す。図 1-18 にはせん断応力～せん断ひずみ関係を、図 1-19 には有効応力経路図を示している。いずれの図からも非排水繰返し三軸試験では、動的載荷中の有効拘束圧の変化が反映され、圧縮－伸張で異なる挙動を示している。また、同じねじり載荷での試験結果では、 K_0 圧密条件において、過剰間隙水圧の上昇量が少なくなっている。

図 1-20(a)(b)には γ_{DA} 、 $\angle U/\sigma_{m0}'$ と、繰返し回数 N_c を両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA}=7.5\%$ 時の回数 $N_{\gamma_{DA}=7.5\%}$ で正規化した $N_c/N_{\gamma_{DA}=7.5\%}$ の関係を示している。図 1-20(a)において、繰返し三軸試験の場合、せん断ひずみは直線的な増加を示しているが、ねじりせん断試験では指数関数的である。また、試験条件間の差は繰返し回数の少ない時点で顕著に見られている。一方図 1-20(b)からは、載荷方法、圧密条件による差は見られない。次に、図 1-21 は、繰返しせん断応力比 τ_d/σ_{m0}' と 1.5、3、7.5、10%の両振幅せん断ひずみ γ_{DA} が生じるまでの繰返し回数 N_c の関係を示している。液状化強度を定義する場合によく用いられる $\gamma_{DA}=7.5\%$ で $N_c=20$ のときの τ_d/σ_{m0}' を比較すると、試験条件の違いによる差は小さい。しかし、 N_c が小さくなると差が生じている。一方、 γ_{DA} が小さいときは、繰返し三軸試験での応力比 R が、ねじり試験でのその値に比べて繰返し回数 N_c に関係なく小さくなっている。これは伸張時に有効拘束圧が小さくなる状態でひずみが生じやすくなっているためと推察されている。このひずみレベルでの液状化強度の大小関係は繰返し三軸試験の結果が最も小さく、 K_0 圧密条件におけるねじりせん断試験が最も大きな値を示す結果となっている。このことから、ある繰返しせん断応力比で、任意のせん断ひずみを生じる繰返し回数は、大きなひずみレベルにおいては、試験条件や応力状態の相違による差は小さいものの、小さなひずみレベルでは大きな差となることが認められている。

1-3 長期圧密および過圧密履歴が液状化強度に与える影響に関する既往の研究

1-3-1 木村、龍岡、プラダン・テージ B・S の研究(1986)

豊浦砂を使用して圧密時間 0.1～1630 時間に変化させた条件の下で繰返し三軸試験を行った

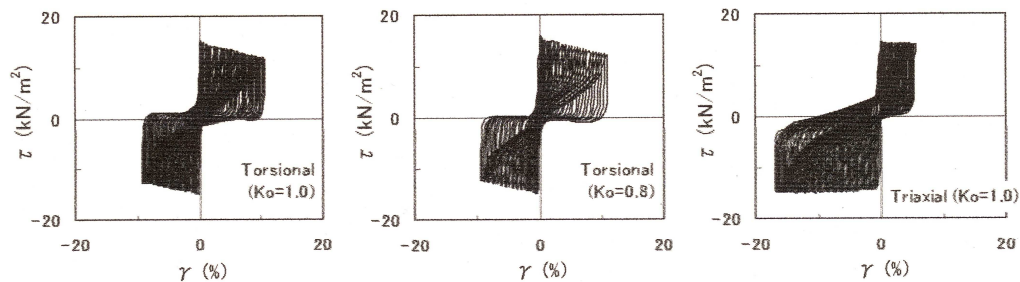


図 1-18 せん断応力～せん断ひずみの関係

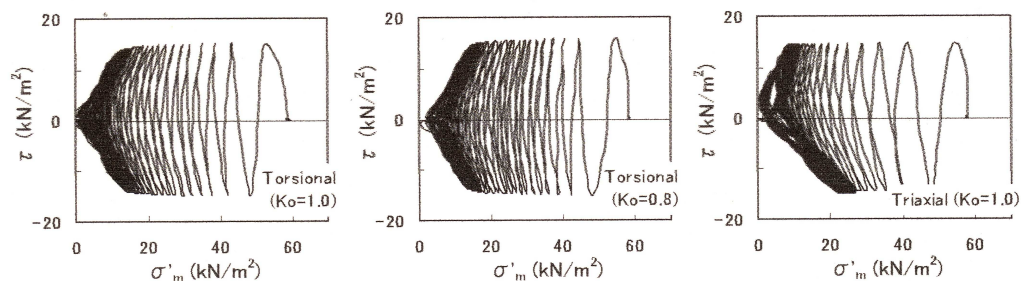


図 1-19 応力経路図

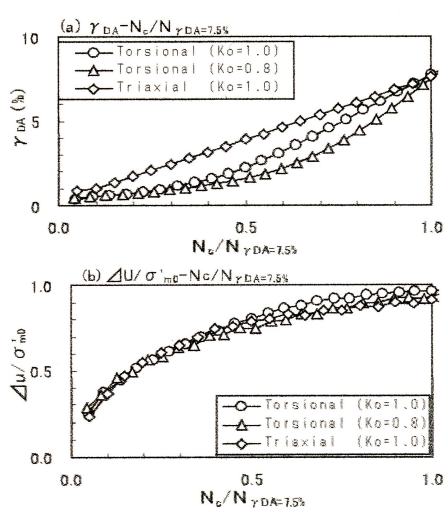


図 1-20 せん断ひずみ、過剰間隙水圧～正規化繰返し回数の関係

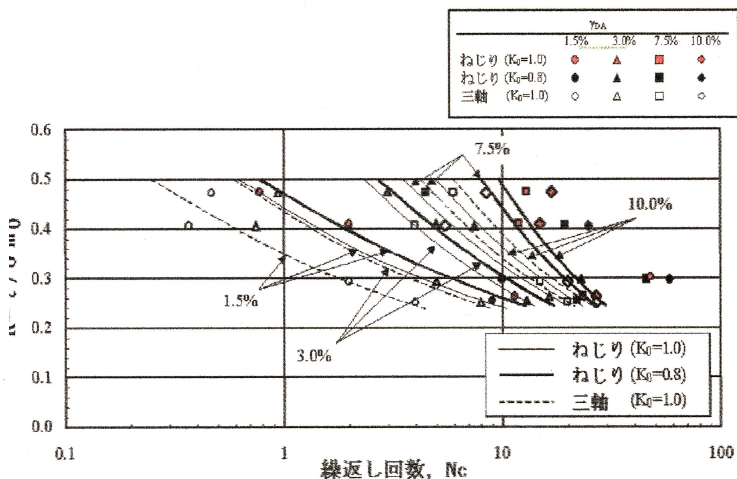


図 1-21 繰返しせん断応力比～繰返し回数の関係

結果によると、圧密時間（tc）0.1～64 時間の範囲では液状化強度の変化は見られなかったが、1630 時間では 20%ほど液状化強度の増加が確認された。そして過圧密履歴、圧密時間による液状化強度の増加は両方とも塑性ひずみが共通のパラメータとなっていることが分かった。そこで今回の研究では豊浦砂より細粒分が多く粒度の違う浅間山砂を使用して同様の実験を行い豊浦砂と比較した。使用した試料は豊浦砂と浅間山砂で、その粒径加積曲線と物理定数を図 1-22 に示す。実験方法は、供試体に O_2 を約 0.01kgf/cm^2 の圧力で 1 時間程度通した後、約 50cm の水頭差で脱気水を通した。有効拘束圧は $\sigma' = 1.333\text{kgf/cm}^2$ とし、背圧は $\sigma_{bp} = 2.0\text{kgf/cm}^2$ とした。B 値 ≥ 0.96 の供試体だけに対して実験を行った。供試体は $D_r = 80\%$ ($\rho_d = 1.6577\text{gf/cm}^3$) を目標とした。繰返し載荷周波数は $f = 0.1\text{Hz}$ の正弦波で第 1 波目は圧縮荷重とした。圧縮荷重振幅 P と伸張荷重振幅 P_E の比は常に $0.95 \leq P/P_E \leq 1.05$ を原則とした。過圧密比は σ' に対して 2, 4 にした。圧密時間の影響を調べた実験では、圧密時間を 0.1, 1, 64, 1630 時間とした。圧密時間 0.1～64 時間ではセル水には普通の水道水を使用した。1630 時間ではセル水として脱気水を使用し空気とセル水の境界を供試体から遠く離れた。これはセル水に空気が溶け込んで、その水がメンブレンを通して供試体内に入らないようにするためである。過圧密の方法も前回と同様に、最初に $\sigma' = 1.333\text{kgf/cm}^2$ で 1 時間圧密させ、所定の過圧密比まで σ' を上げ、1 時間圧密させる。そしてまた $\sigma' = 1.333\text{kgf/cm}^2$ まで除荷し 1 時間放置し、その後排水繰返し載荷を行っている。供試体内の間隙水には全て純水を使用している。

供試体の密度は厳密には同一ではないので実験結果は図 1-23 (a)～(h)のように整理した。過圧密砂の場合は、過圧密前後の密度を用いてプロットした。tc=16, 64, 1630 時間の場合も圧密開始後 1 時間と所定の圧密時間までの両方の乾燥密度 ρ_d で補正しプロットした。圧密が長期になると、メンブレンがセル水を通すため排水量は正確ではない。圧密開始後 1 時間から所定の圧密時間までの塑性軸ひずみを求め、過圧密履歴による塑性軸ひずみ ε_{aP} と塑性体積ひずみ ε_{vP} の比 $\varepsilon_{vP} = 3.887 \varepsilon_{aP}$ を用いて ε_{aP} から塑性体積ひずみ ε_{vP} を推定した。図 1-24 (a)～(h)において tc=1 時間、(OCR)=1 の場合の平均的 $\rho_d \sim N_c$ 関係を定義し、 $\rho_d = 1.6577\text{gf/cm}^3$ に対する N_c の値を求めた。これ以外の場合は、 ρ_d の変化による N_c の変化の仕方は上記の平均的関係と同様であると仮定し、同じく $\rho_d = 1.6577\text{kgf/cm}^3$ に対する N_c の値を求めた。

図 1-24(a),(b)は豊浦砂と浅間山砂の圧密時間の影響を示す液状化強度曲線であり、 $D_{rc} = 80\%$ 、両振幅軸ひずみ $DA = 10\%$ に対するものである。浅間山砂は豊浦砂に比べ長期圧密による液状化強度の増加が大きいことが分かる。また豊浦砂では見られなかった tc=16, 64 時間の液状化強度の増加が浅間山砂では明らかに認められる。(b)で 1 つのデータシンボルの中に 2 つの点をプロットしてあるのは圧密後 1 時間と所定の圧密時間後の ρ_d に対する繰返し回数をプロットしたものである。両者ともほぼ同じところにある。図 1-25(a)は tc=1 時間、tc=1630 時間と(OCR)=2 の供試体の有効応力経路である。tc=1 時間に比べ tc=1630 時間の方が 1, 2, 4 波目とも過剰間隙水圧が上昇しにくくなっている。図 1-25 (b)は(a)と同じ供試体の応力～ひずみ関係を示したものである。図より tc=1 時間に比べ tc=1630 時間の方が伸張ひずみが生じにくいことが分かる。

図 1-26 は豊浦砂と浅間山砂の長期圧密履歴による液状化強度増加率 R_{tc} と圧密時間 tc の関係を示したものである。ここで、 R_{tc} は以下の式で表される。

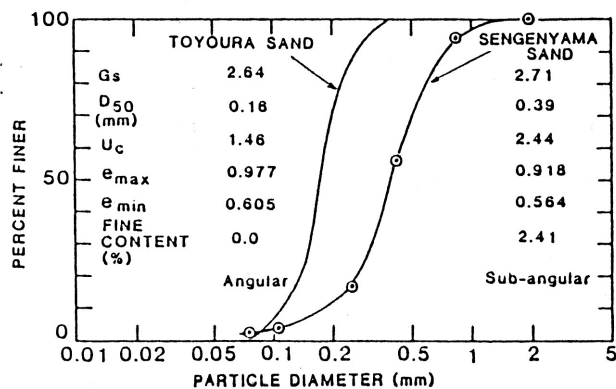


図 1-22 粒径加積曲線と物理定数

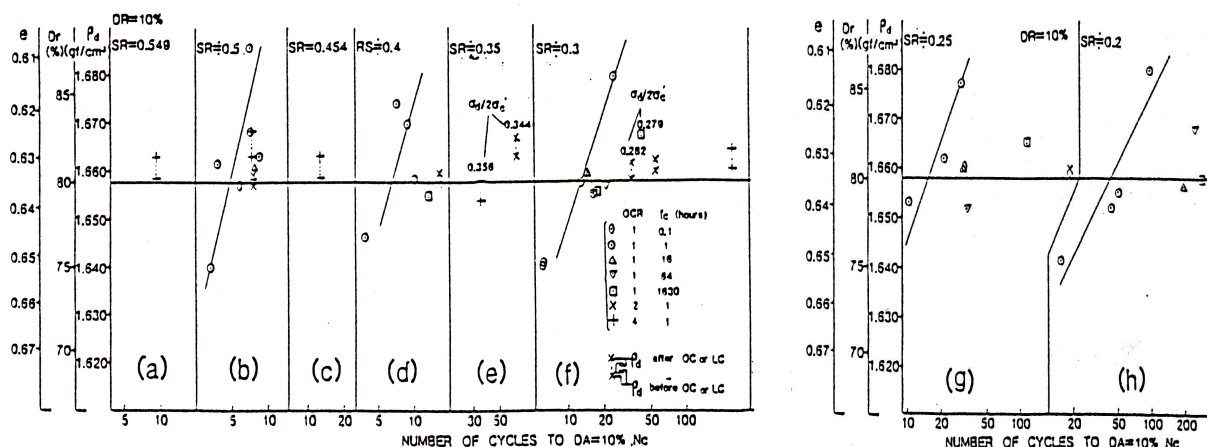
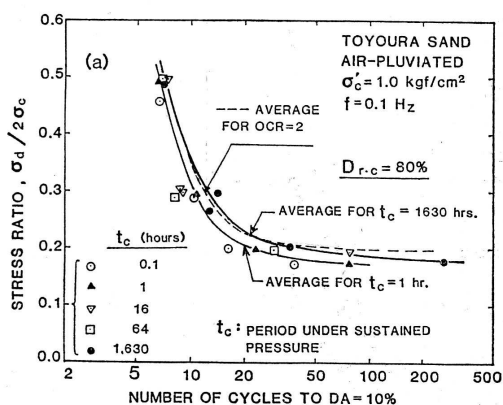
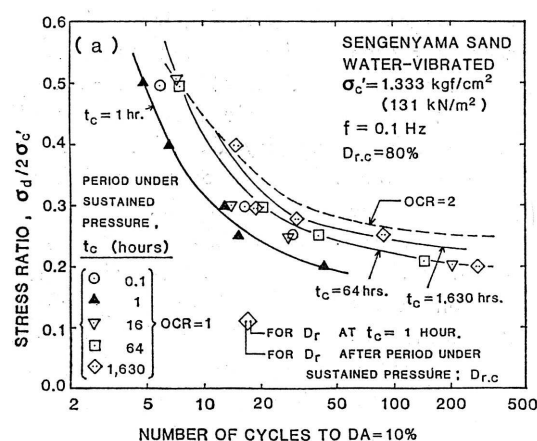


図 1-23 密度と繰返し回数の関係



(a)



(b)

図 1-24 液状化強度に及ぼす圧密時間の影響

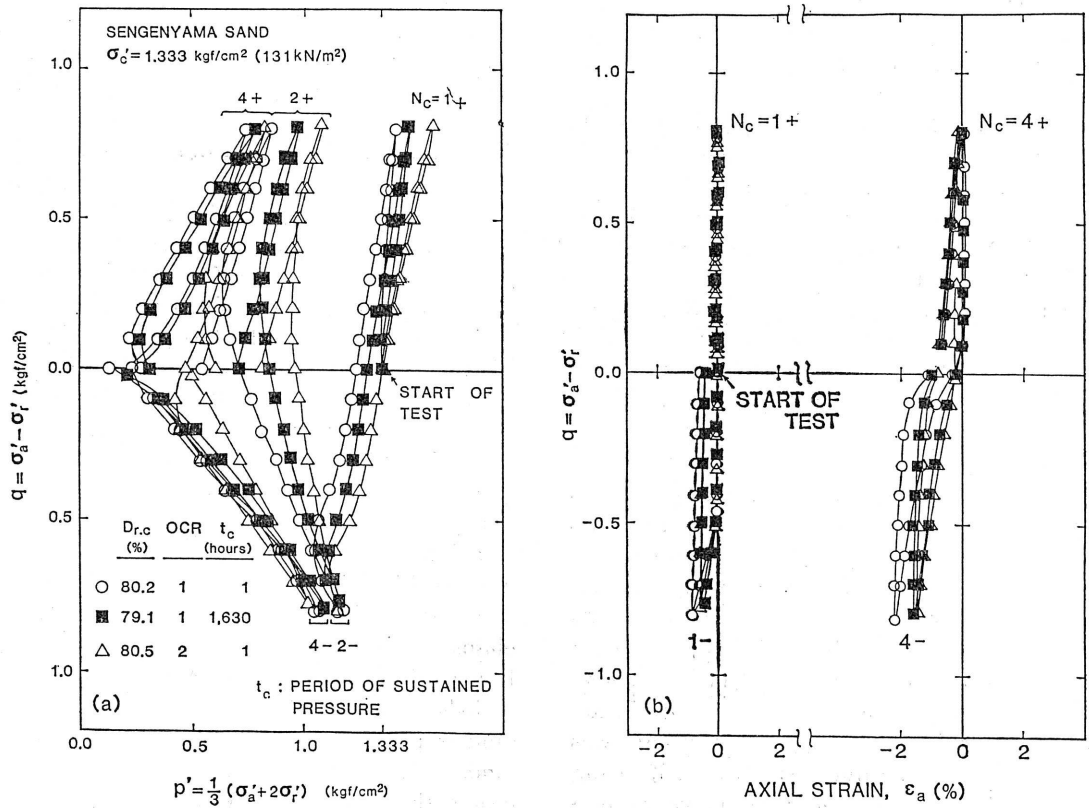


図 1-25 長期圧密と過圧密履歴が有効応力経路および応力～ひずみ関係に与える影響

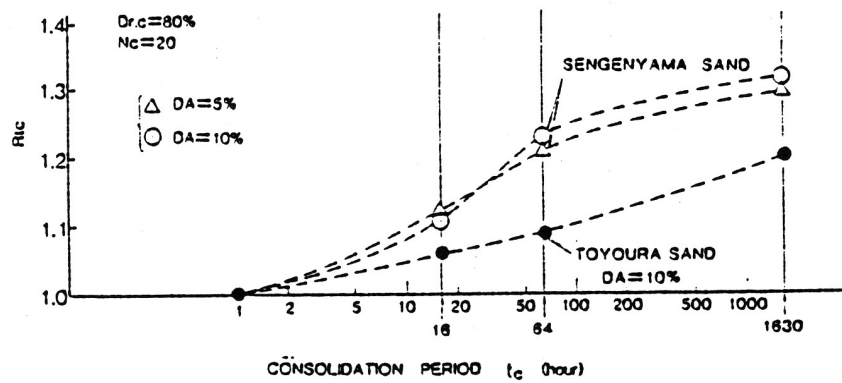


図 1-26 圧密時間と液状化強度増加率の関係

$$\text{長期圧密履歴による液状化強度増加率 } R_{lc} = \frac{\text{長期圧密した供試体の液状化強度比}}{\text{正規圧密した供試体の液状化強度比}}$$

図より圧密時間が増加すると強度増加率が増加するのは豊浦砂と同じ傾向であるが、その強度増加率の度合いは浅間山砂の方が明らかに大きい。

豊浦砂と浅間山砂の供試体では細粒分含有率と供試体作製方法が異なる。2つの砂の長期圧密の影響の差の原因の一つとして細粒分の差が考えられる。一般に細粒分が多いほど不安定な構造ができやすく、その分長期圧密による強度増加率が大きくなることが考えられる。しかし、真の理由は明らかになっていない。

図 1-27(a),(b)は、豊浦砂と浅間山砂の過圧密の影響による液状化強度曲線である。両者を比較すると、長期圧密の場合と同様に浅間山砂の方が液状化強度の増加率が大きい。(OCR)=2の場合の有効応力経路と応力ひずみ関係は図 1-25 に示してある。この図より(OCR)=1の場合に比べて(OCR)=2の場合において明らかに過剰間隙水圧が発生しにくくなっている。また、伸張ひずみが非常に生じにくくなっている。図 1-24 と図 1-27 を見ると、豊浦砂と浅間山砂の両方で長期圧密および過圧密の影響は応力比が大きくなると低下してくる。これは応力比が大きくなると三軸伸張側で早い繰返し載荷時に有効応力経路が変相線を越えるようになってひずみが大きくなり繰返し載荷開始時に存在していた長期圧密や過圧密の影響が減少してゆくと考えられている。

図 1-29 は過圧密による液状化強度増加率 R_{oc} と過圧密比の関係を示したものである。ここで、 R_{oc} は以下の式で表される。

$$\text{過圧密履歴による液状化強度増加率 } R_{lc} = \frac{\text{過圧密した供試体の液状化強度比}}{\text{正規圧密した供試体の液状化強度比}}$$

図より豊浦砂に比べ浅間山砂では過圧密比の増加による液状化強度増加率が大きいことが分かる。 $R_{oc}=(OCR)^n$ の式にあてはめると浅間山砂の場合 $n=0.4$ の曲線で近似できる。図 1-29 は長期圧密(LC)および過圧密(OC)による液状化強度増加率(R_{oc} , R_{lc})と塑性軸ひずみ ϵ_a^p との関係を示したものである。豊浦砂のデータポイントは複数の値を平均したものである。浅間山砂も豊浦砂と同様に液状化強度増加率は塑性軸ひずみに支配されているようである。同じ塑性軸ひずみに対する強度増加率は浅間山砂の方が大きいことが分かる。

図 1-24 を見ると浅間山砂の場合、1 時間の(OCR)=2 の過圧密履歴の方が 1630 時間の(OCR)=1 の長期圧密履歴よりも液状化を増加させる率が若干大きいことが分かる。これは豊浦砂の場合とよく似た傾向である。

以上の結果より明らかになったことを以下に示す。

- 1) 長期圧密と過圧密履歴による液状化強度の増加は豊浦砂よりも浅間山砂の方が大きな値を示した。
- 2) 浅間山砂も豊浦砂と同様に塑性軸ひずみ ϵ_a^p が長期圧密と過圧密履歴に関して液状化強度増

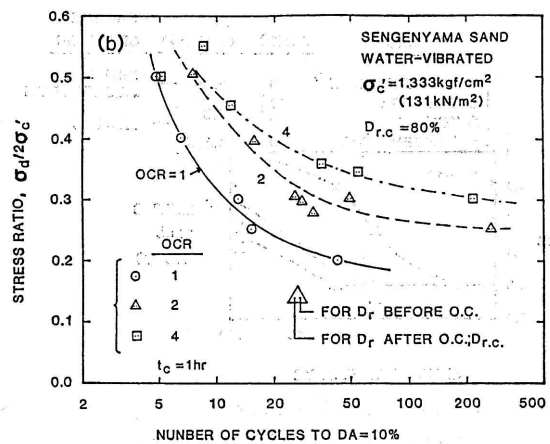
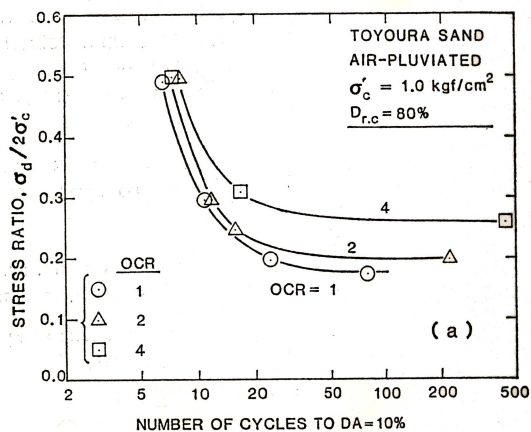


図 1-27 液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響

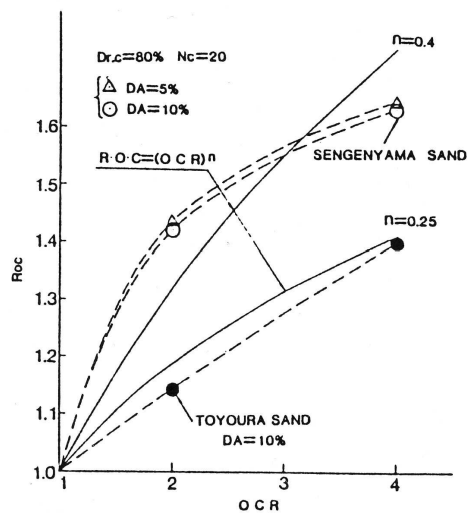


図 1-28 過圧密比と液状化強度増加率の関係

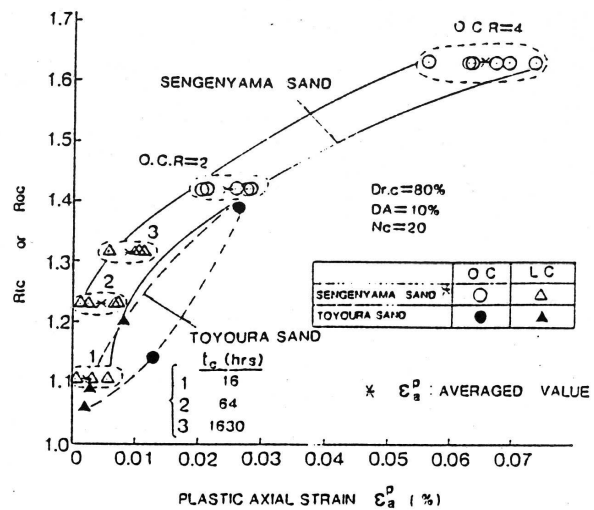


図 1-29 液状化強度増加率と塑性軸ひずみの関係

加率の共通のパラメータである。

3)浅間山砂では 0.1 年(=36 日)で大体 $R_{tc}=1.3$ である。 $tc=100\sim 1000$ 時間での R_{tc} の増加率は大体以下の式で表される。

$$\frac{\Delta R_{tc}}{\Delta \log_{10} tc} = \frac{0.06}{\log_{10} tc \text{ の 1 サイクル}}$$

したがって、さらに $tc>1630$ 時間に対してもこのまま R_{tc} が増加してゆくとすると 1 年後には $R_{tc}=1.3\times 1.06=1.38$ 、10 年後には $R_{tc}=1.3\times (1.06)^2=1.46$ 、100 年後には $R_{tc}=1.3\times (1.06)^3=1.55$ になる。

1-4 K_0 圧密試験についての既往の研究

1-4-1 辰井、佐藤、鈴木の研究(1993)

試料には、豊浦砂およびクレーサンドを用いている。試験条件を表 1-5 に示す。供試体寸法は直径 $\phi 5\text{cm}$ 、高さ $H10\text{cm}$ である。実験においては、はじめに三軸セル内で二酸化炭素と脱気水を通したのち、 0.2kgf/cm^2 の有効応力のもと等方圧縮している。載荷速度は、ともに軸応力増減が毎分 0.018kgf/cm^2 となるように制御している。なお、繰返し K_0 圧密試験では、 K_0 試験より得られた K_0 値に沿って主応力比一定($\sigma_3/\sigma_1=K_0$ 値)条件下で載荷した後、除荷、再載荷を行っている。

本研究で使用した試験装置の概要を図 1-30 に示す。内体積変化は、背圧載荷型の重量式変化形を用いて計測し、外体積変化は二重セル方式で側方変位を内セル内の水位変化に変換して計測している。 K_0 条件の制御には空圧サーボシステムを用い、1 秒間に 10 回の割合で比較-判断-制御を行っている。

図 1-31 に、豊浦砂に対する K_0 条件下での載荷および除荷時の応力経路を示す。この図から応力経路が等方応力状態からかなり離れており、載荷時の K_0 値は $0.35\sim 0.37$ 程度であることが分かる。これは、供試体内部で砂粒子の再配列が著しく起っており、 D_r の相違による初期構造異方性の差が見られなくなるためと考察されている。また、除荷過程では K_0 値は一定値を示さないことが分かる。

図 1-32 は K_0 値と平均有効主応力 σ_m の関係を示している。この図より、除荷過程では K_0 値が急激に増加し一定値を示さず、再載荷過程では、 K_0 値は急激に減少し、処女載荷時の K_0 値に漸近していることが分かる。

1-4-2 王、西江、池田の研究(1997)

試料には、シンウォールサンプリングにより採取($GL-16.00\sim 16.85\text{m}$)した乱さない沖積の海成粘土を用いている。試料の土質工学性質は、 $\rho_t=1.595\text{g/cm}^3$ 、 $e_0=1.766$ 、 $I_p=35.1$ 、 $q_u=1.26\text{kgf/cm}^2$

表 1-5 試験条件 (辰井ら、1993)

条件 試料	乾燥密度 (g/cm ³)	載荷条件
豊浦標準砂	1.537 ($D_r \approx 60\%$)	圧縮・除荷
"	1.615 ($D_r \approx 90\%$)	"
"	1.621 ($D_r \approx 90\%$)	圧縮・除荷・再載荷
クレー サンド	1.485	"

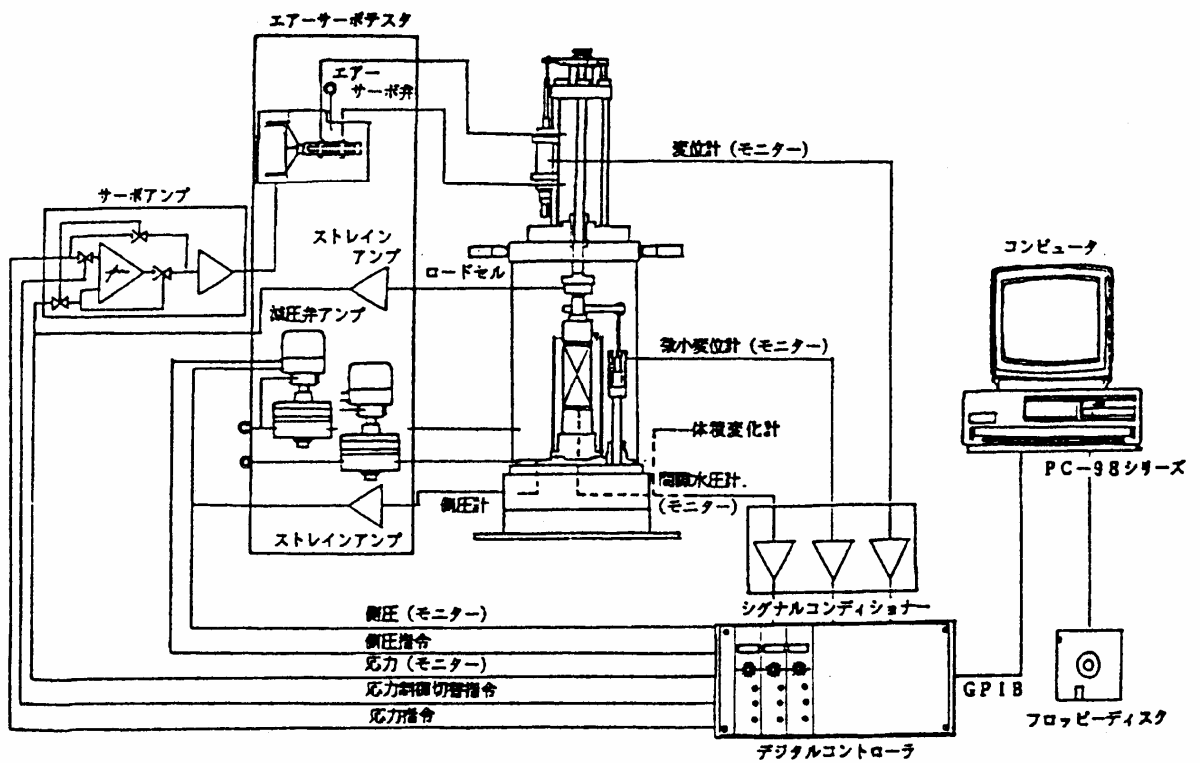


図 1-30 三軸試験装置制御系概略図 (辰井ら、1993)

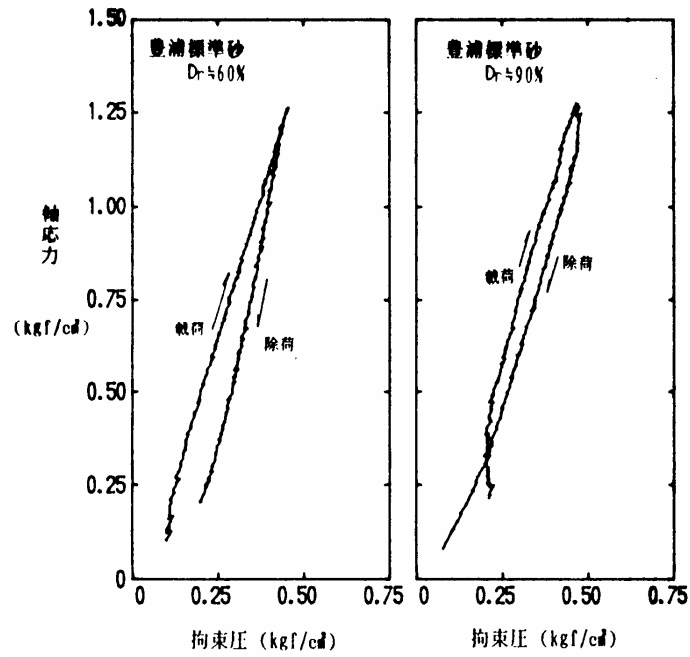


図 1-31 K_0 応力条件下での応力経路図
(辰井ら, 1993)

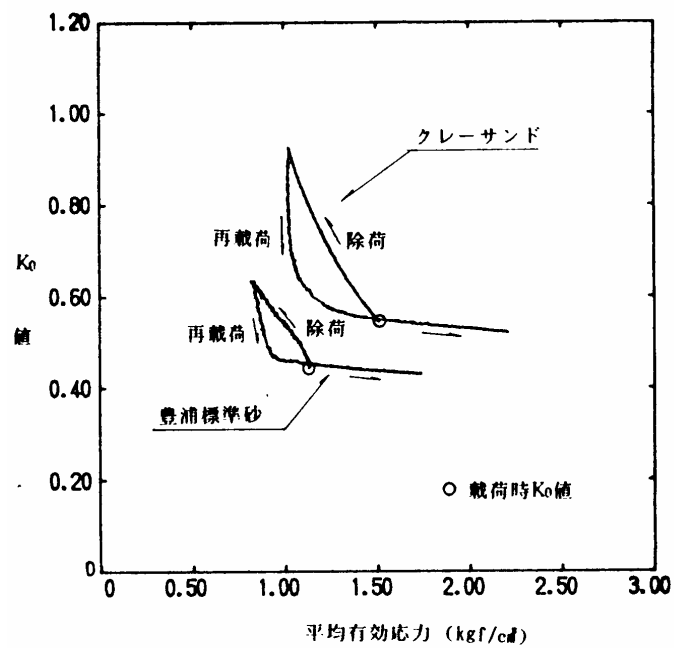


図 1-32 K_0 値と平均有効主応力 σ_o の関係
(辰井ら, 1993)

である。供試体は高さ $H=10\text{cm}$ 、直径 $\phi=5\text{cm}$ の円柱形とし、二酸化炭素と脱気水により飽和させた後、初期有効拘束圧 0.1kgf/cm^2 で 1 時間等方圧密している。

試験装置を図 1-33 に示す。本装置は、内セルの水位変化を三軸セル内に設置したギャップセンサーで検知することで、試験中の供試体の体積変化を測定することができる。併せて、内セルの上部は、自由開放水面積をできるだけ小さくしており、水位変化量の測定精度を向上させている。また、軸圧縮応力は、セル内のロードセルを分けてサーボモーターコントローラーで、側圧は圧力変換器を介して E/P で、各々コントロールできる仕組みであるため、軸圧縮応力と側圧同時並行で制御できる。

今回試作した装置は、側方ひずみが $\pm 0.02\%$ 以下に収まるように 1 秒～3 秒毎にフィードバック制御している。また、処女載荷→除荷→再載荷といった繰返し応力を受ける場合を想定して、任意の応力載荷経路下での試験を可能にするため、毎分 0.01kgf/cm^2 の速度で軸圧縮応力も制御できるようにしている。 K_0 圧密載荷過程では、①毎分 0.01kgf/cm^2 の一定速度で 2.5kgf/cm^2 まで漸増載荷(処女載荷)し、②載荷時と同じ速度で 0.2kgf/cm^2 まで除荷させて、リバウンド量を開放し、さらに、③処女載荷と同じ速度で 2.5kgf/cm^2 まで再載荷し、最後に④毎分 0.2% の軸ひずみ速度で供試体の破壊まで非排水せん断している。なお、軸圧縮力が一定時の圧密判定には、3t 法を用いている。

図 1-34 に K_0 圧密時の載荷経路を示す。この図より、処女載荷では圧密応力の増加に従い、 K_0 値が 0.3 程度まで激減しその後 $K_0=0.4$ 程度まで増加している。除荷時には処女載荷に比べ明らかに大きな K_0 値を示している。また、再載荷時には載荷、除荷時の中間の値を示していることが分かる。このように、処女載荷、除荷、再載荷の K_0 曲線は大きく異なる。これは、除荷時の変形係数が再載荷時の変形係数よりも大きいことを示している。

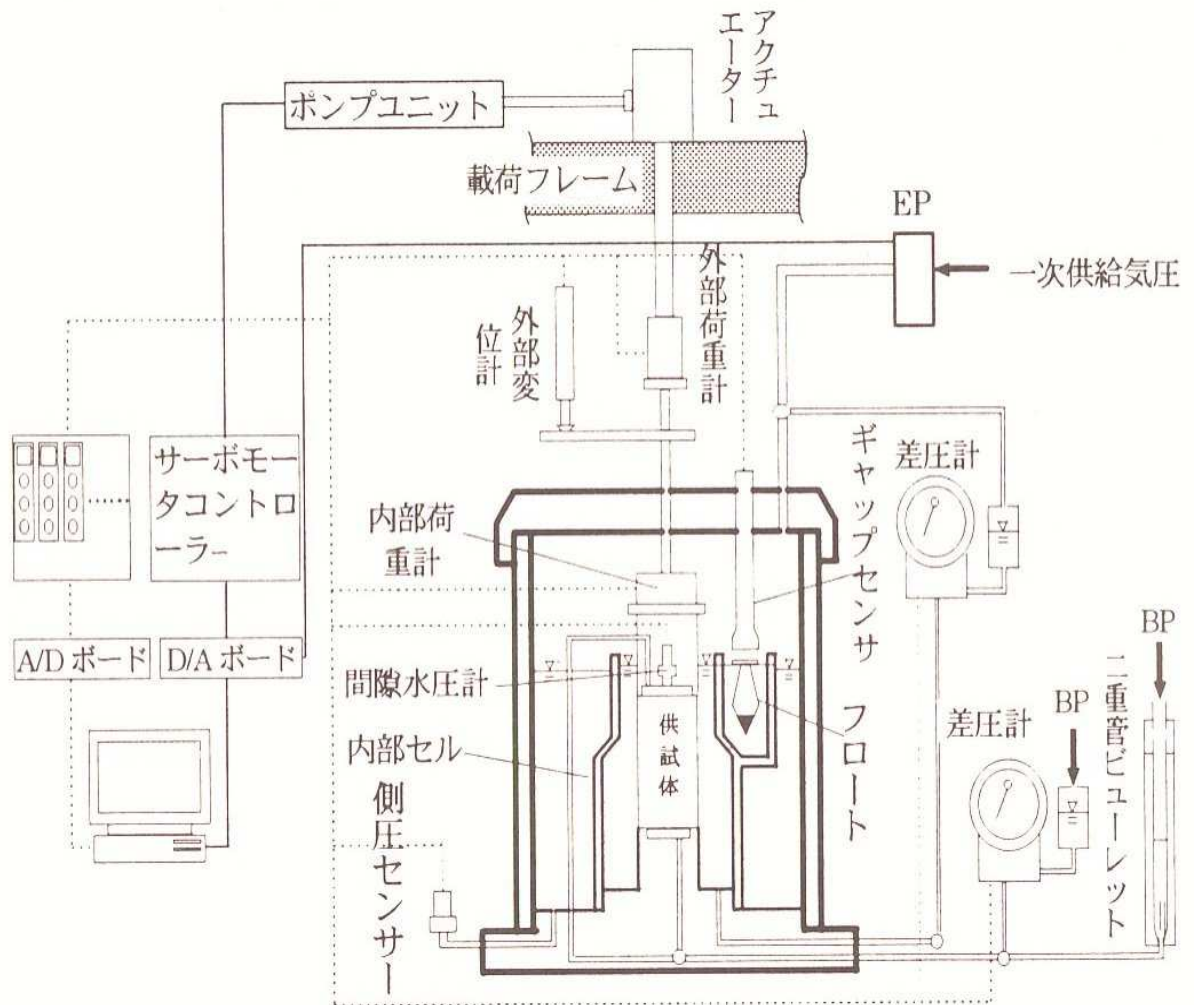


図 1-33 K_0 圧密载荷装置(王ら、1997)

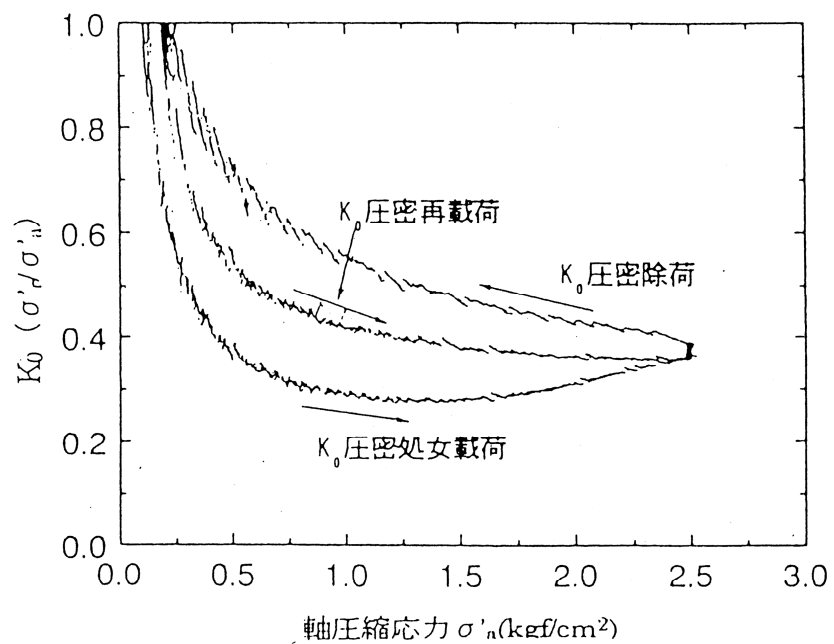


図 1-34 K_0 値と鉛直有効応力の関係(王ら、1997)

1-5 過圧密履歴を利用した液状化対策工

1-5-1 液状化対策工について

近年、液状化対策として大きく分けて二種類の工法がある。一つは地盤に改良等を施して、液状化を生じさせないように地盤を強化する工法であり、もう1つは地盤改良を前提としないで地盤が液状化にも基礎構造で被害を軽減しようとする工法である。ここでは前者の中の過圧密を利用した工法のいくつかを示す。

1-5-2 過圧密効果の期待できる工法

(1) 地下水位低下工法

我が国は諸外国に対して一般に地下水位が高く、また平地面積の少ない国土に人口が集中し、道路、鉄道、その他の構造物も地下水論的に条件の悪い地域を避けることができないのが実情であり、その意味からも地下水位低下工法の意義は高いものとなる。

地下水位低下工法には、一時的な排水を目的としたディープウェル工法、ウェルポイント工法などがある。この中で代表的なウェルポイント工法について述べる。ウェルポイント工法は掘削を行おうとする部分の周囲にウェルポイントを設置し、真空をかけて強制的に排水させる工法である。この工法は、掘削時の排水やボーリングの防止ばかりではなく、粘性土層の圧密を促進する狭義の地盤改良にも使われる。ウェルポイントで地下水位が下がっても土中の水分は粒子間に保持されてそれほど減少しない。したがって、土の重量そのものは変わらず、土層中の有効応力がそれだけ増加し、圧密が促進される。砂質土地盤についても同様の効果があり、有効荷重の増加によってある程度まで締め固められる。ただし、ウェルポイント等で永久的に地下水位を低下させたままにすると経済面からも周囲への公害という面からも問題がある。

(2) 載荷盛土工法

予圧密工法、事前載荷工法などの名称があり、構造物を築造するに先立って地盤の圧密沈下を事前に済ませると同時に、圧密により基礎地盤を強化することを目的とするものである。適用地盤としては粘性土地盤の沖積層、埋立層が挙げられ、工法の理論的裏付けとして粘性土は圧密現象によりその強度が増加し、しかも一度圧密により沈下した地盤は除荷しても実用上元には戻らないということが基になっている。軟弱層が厚い場合、圧密をより早く進行させるためサンドドレーン工法、ペーパードレーン工法などと併用されることが多く、軟弱層が薄い場合は本工法が単独で用いられる。本工法では他の工法と比較し長大の日数を必要とする特徴があるため、少しでも時間を有効に用いなければならない。

(3) 動圧密工法

おもりを自由落下させるだけの単純な方法で場合により粘性土にも効果がある。砂質土を対象とする場合は衝撃工法の一種と考えられる。クレーンまたはやぐらを用いて、10 t～30 tの

おもりを 30m 以下の高さから落とすことが多い。

(4) 大気圧工法

大気圧工法は、ビニールシートなどの気密膜で地面を覆い、真空ポンプをかけて内部の圧力を下げ、有効荷重を増す工法である。この方法は、粘性土中の間隙水圧を下げて有効荷重を増し圧密を促進させる工法で、載荷重を必要としない。したがって、表層が軟弱で盛土が困難な埋立地や載荷盛土を撤去しなければならない場合などに適している。

1-6 研究目的

1964 年新潟地震以降、液状化の研究が本格的に開始され、現在様々な種類の液状化対策工法が実用化されてきている。しかし、さらに手軽かつ安価に施工可能な液状化対策工法の開発が期待されている。その有効な対策工法の一つとして過圧密を利用した工法がある。この過圧密工法の中には載荷盛土工法や地下水位低下工法といった過圧密を利用した工法があり、実際、1995 年兵庫県南部地震では、地盤改良した埋立地が過圧密履歴を受けていたために、液状化の被害が少なかったのではないかと推察された事例がある。

これまで過圧密履歴による液状化強度増加の効果を目的とした室内試験として繰返し三軸試験等が行われてきた。しかし、地盤の初期応力状態が等方状態であるのはまれなことであり、実際の地盤内の応力状態を再現することが重要であると思われる。また、繰返し載荷時に供試体に側方変位が生じて、地震時における地盤内の応力・変形状態を再現することができない。例えば、水平地盤内では、 K_0 応力状態が保持されたまま過圧密履歴および繰返しせん断応力が作用するが、繰返し三軸試験ではそのような条件を満足させることは不可能である。その状態を正確に再現するためには側方変位を拘束した状態で繰返し試験を行う必要がある。また、過圧密履歴を実際の地盤に与える工法として載荷盛土工法と地下水位低下工法の 2 種類の工法が挙げられるが、これらの工法による過圧密履歴による効果はその過圧密履歴の与え方の違いから異なることが予想される。それらの違いを把握することは、液状化対策工を实地盤に適用する場合に重要であると考えられる。さらに、実施工において過圧密工法が適用される場合、載荷盛土工法における盛土の載荷時間、地下水位低下工法における地下水位低下時間といった時間の影響も調べることが重要であると思われる。実際、現在まで行われている研究において、種々の工法による過圧密効果や過圧密効果に与える長期圧密の影響についてはまだ十分に明らかにされていないと考えられる。

そこで、本研究では、過圧密履歴を受けた水平地盤に地震力が作用する場合を想定し、より精度の高い過圧密工法の実用化を目指し、二重セル型中空ねじり試験装置を用いて K_0 応力条件下での過圧密砂の液状化強度特性を調べる。また、水平地盤における過圧密履歴を与える方法として、載荷盛土工法と地下水位低下工法を想定し、これら 2 種類の工法およびこれらの工法を組み合わせた場合による過圧密効果の比較や圧密時における K_0 値の挙動、過圧密過程において最大有効応力を長期間受けたときの過圧密効果、および長期間圧密された地盤における過圧密効果についても検討することを目的としている。