

## 第4章 $K_0$ 圧密により過圧密履歴を受けた砂の液状化試験

### 4-1 目的

前章で述べたように、載荷盛土工法と地下水位低下工法による過圧密履歴を再現してみると、載荷盛土工法を想定した軸圧制御の場合、過圧密比の増加に伴って静止土圧係数  $K_0$  の値が増加するのに対し、地下水位低下工法を想定した背圧制御の場合、 $K_0$  値がほとんど変化しないという結果を得た。また、軸圧制御、背圧制御を組み合わせた場合、その組み合わせ方法により  $K_0$  値の挙動、圧密終了後の  $K_0$  値に違いが見られることも前章の結果で明らかになっている。

そこで本章では、原位置地盤において載荷盛土工法、地下水位低下工法および2種類の工法を組み合わせた場合を想定し、二重セル型中空ねじりせん断試験を行い、過圧密履歴を受けた砂の液状化強度特性の検討を行うことを目的としている。

### 4-2 概要

本章では、表4-1におけるケース(A)~(H)の結果について考察し、載荷盛土工法、地下水位低下工法およびそれらを組み合わせた場合を想定し、 $K_0$  応力条件下での過圧密砂の液状化強度特性を調べた。ここで軸圧制御、背圧制御およびそれらを組み合わせた場合の過圧密比  $(OCR)_v = 1$  の実験結果は、軸圧制御で過圧密履歴を与えた場合の過圧密比  $(OCR)_v = 1$  の結果と同一のものがある。

本章の実験では、供試体は空中落下法により相対密度  $Dr = 45\%$  になるように作製し、軸圧制御、背圧制御およびそれらを組み合わせることで過圧密履歴を与えた後、鉛直変位を拘束して繰返し載荷を行った。

過圧密履歴は、前章にて示したように所定の初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}' = 49 \text{ kPa}$  まで軸圧制御により  $K_0$  圧密した後、 $\sigma_{v0}'$  の2倍、3倍または5倍の鉛直有効応力  $\sigma_v'$  を与え、その後  $\sigma_v'$  を初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  まで除荷する方法で再現した。

### 4-3 液状化強度に与える過圧密効果について

#### 4-3-1 軸圧制御、背圧制御における繰返し試験結果

図4-1にケース(A)の繰返し試験で得られた液状化に至るまでの鉛直有効応力  $\sigma_v'$ 、水平全応力  $\sigma_h$  と鉛直全応力  $\sigma_v$  の比  $\sigma_h/\sigma_v$ 、鉛直全応力  $\sigma_v$ 、せん断応力  $\tau$ 、せん断ひずみ  $\gamma$ 、過剰間隙水圧比  $\Delta u/\sigma_{h0}'$ 、繰返し応力比  $\tau/\sigma_v'$ 、平均有効主応力  $\sigma_o'$  および水平全応力  $\sigma_h$  の代表的な経時変化を示す。これらの図より、せん断応力が繰返し作用すると、せん断ひずみ  $\gamma$  があるときから急激に上昇し、過剰間隙水圧比  $\Delta u/\sigma_{h0}'$  が1.0に到達している。この急激なせん断ひずみの発生あるいは過剰間隙水圧比が1に達したときを液状化が発生したと判断する。この液状化時においては、鉛直有効応力  $\sigma_v'$  および平均有効主応

表 4-1 実験ケース

ケース	応力履歴	過圧密比(OCR) <sub>v</sub>	圧密時間
(A)	軸圧制御	1	1hr
		2	
		3	
(B)	背圧制御	2	1hr
		3	
(C)	軸圧載荷⇒ 背圧減少⇒ 背圧増加⇒ 軸圧除荷	3	1hr
		5	
(D)	軸圧載荷⇒ 背圧減少⇒ 軸圧除荷⇒ 背圧増加	3	1hr
(E)	軸圧載荷⇒ 軸圧除荷⇒ 背圧減少⇒ 背圧増加	2	1hr
(F)	背圧減少⇒ 軸圧載荷⇒ 軸圧除荷⇒ 背圧増加	3	1hr
(G)	背圧減少⇒ 軸圧載荷⇒ 背圧増加⇒ 軸圧除荷	3	1hr
(H)	背圧減少⇒ 背圧増加⇒ 軸圧載荷⇒ 軸圧除荷	2	1hr

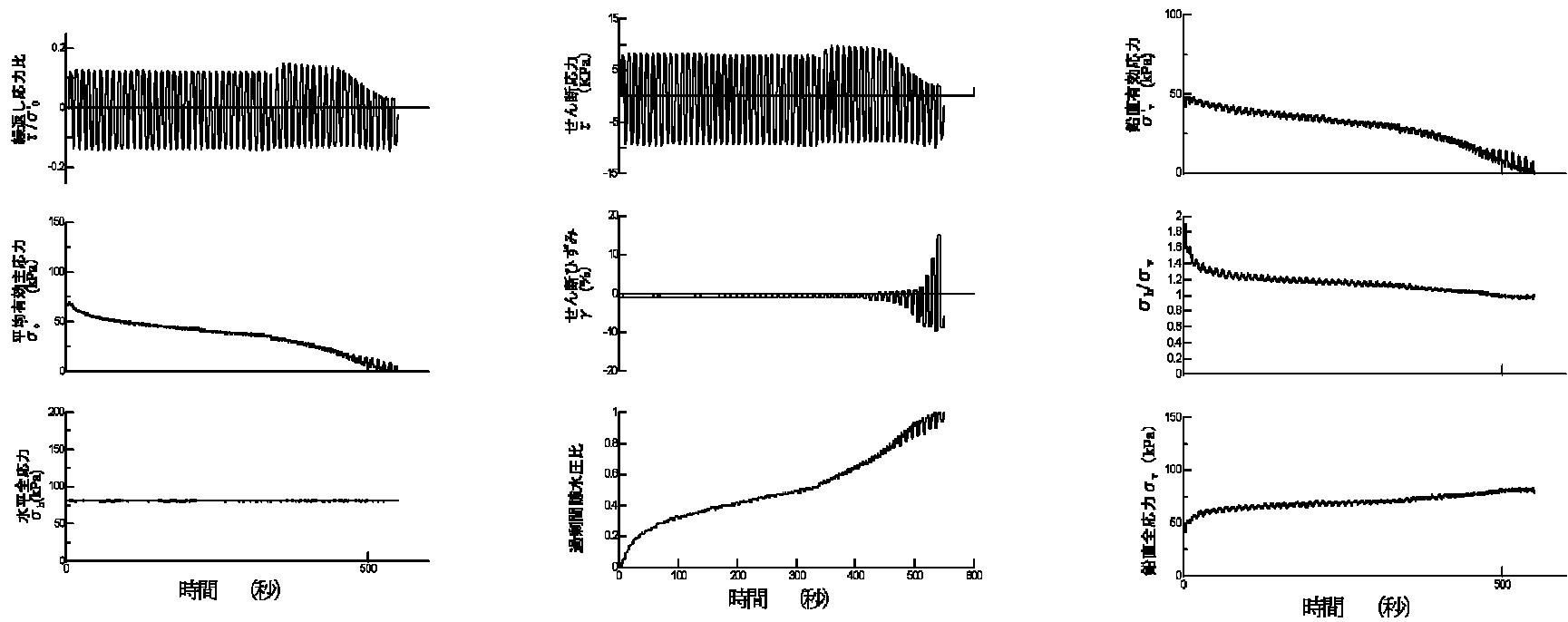


図 4 - 1 時刻歴

力 $\sigma_o'$ がそれぞれゼロに達している。これより、水平有効応力 $\sigma_h'$ もゼロに達していることがわかる。また、鉛直全応力 $\sigma_v$ が載荷開始から上昇を始め、液状化時には水平全応力 $\sigma_h$ に等しくなっている。このことから、液状化時に全応力が等方状態になっていることが確認できる。次に、水平全応力 $\sigma_h$ が繰返し載荷開始時から終了時まで一定であるが、これは水平方向に作用している応力には変化がないが、水平有効応力 $\sigma_h'$ はゼロに向かい減少することから、過剰間隙水圧の上昇によって水平全応力が全て水圧に変化したものと推察される。なお、本ケースでは、圧密終了時に $K_0$ 値が1.0よりも大きくなっているため、繰返し載荷においては、 $\sigma_h$ が一定で、 $\sigma_v$ が増加している。

次に、ケース(A)、(B)における繰返し試験で得られた繰返し応力比 $R$ と両振幅せん断ひずみ

DAが7.5%に至るまでの繰返し回数 $N_c$ の関係を図4-2、4-3に示す。図4-2では繰返し応力比 $R$ として、せん断応力 $\tau$ を初期有効拘束圧 $\sigma_o'$ で除した値を、図4-3では繰返し応力比 $R$ として、せん断応力 $\tau$ を初期鉛直有効応力 $\sigma_{vo}'$ つまり49 kPaで除した値をそれぞれ用いている。図4-2において、軸圧制御の場合(ケース(A))、過圧密比(OCR) $_v$ の増加に伴う繰返し応力比 $R$ の増加が見られず、過圧密効果を確認することができない。これは $K_0$ 圧密試験において、軸圧制御により過圧密履歴を与えた場合、過圧密比(OCR) $_v$ が大きくなるほど繰返し載荷直前の $K_0$ 値は大きくなり、過圧密後の有効拘束圧 $\sigma_o'$ も過圧密比(OCR) $_v$ の増加に伴って大きくなっているためと推察される。一方、背圧制御の場合(ケース(B))は過圧密効果を確認することができる。次に図4-3においては、過圧密比(OCR) $_v$ の増加に伴って、軸圧制御、背圧制御共に繰返し応力比 $R$ の増加が確認でき、過圧密効果を確認することができる。ここで、図4-2と図4-3で背圧制御の場合の繰返し応力比 $R$ を比較すると、 $\tau/\sigma_{vo}'$ よりも $\tau/\sigma_o'$ の方が繰返し応力比の差で見れば大きな過圧密効果を示しており、軸圧制御の場合と逆の状態になっていることが確認できる。これは、前述したとおり、背圧制御時において鉛直有効応力と水平有効応力が等方的に作用するため側方変位がほとんど現れず、鉛直有効応力と水平有効応力が同等に変化することで、過圧密比(OCR) $_v$ が変化しても最終的な $K_0$ 値は変化せず、繰返し載荷直前の初期有効拘束圧 $\sigma_o'$ も変化しないことから、 $\sigma_o'$ よりも $\sigma_{vo}'$ の方が大きな値を示したためであると推察される。

#### 4-3-2 組み合わせた場合における繰返し試験結果

図4-4~4-7にケース(C)~(H)における繰返し試験で得られた繰返し応力比 $R$ と両振幅せん断ひずみDAが7.5%に至るまでの繰返し回数 $N_c$ の関係を示す。図4-4、4-6では繰返し応力比 $R$ として、せん断応力 $\tau$ を初期有効拘束圧 $\sigma_o'$ で除した値を、図4-5、4-7では繰返し応力比 $R$ として、せん断応力 $\tau$ を初期鉛直有効応力 $\sigma_{vo}'$ つまり49 kPaで除した値をそれぞれ用いている。

図4-4において、ケース(C)、(D)、(E)は比較対象とする軸圧制御で過圧密比(OCR) $_v=1$ の結果よりも高い繰返し応力比を示しているが、各ケースで比較すると、3ケースとも大きな繰返し応力比の相異は見られない。そこで、図4-5において比較してみると、ケース(C)

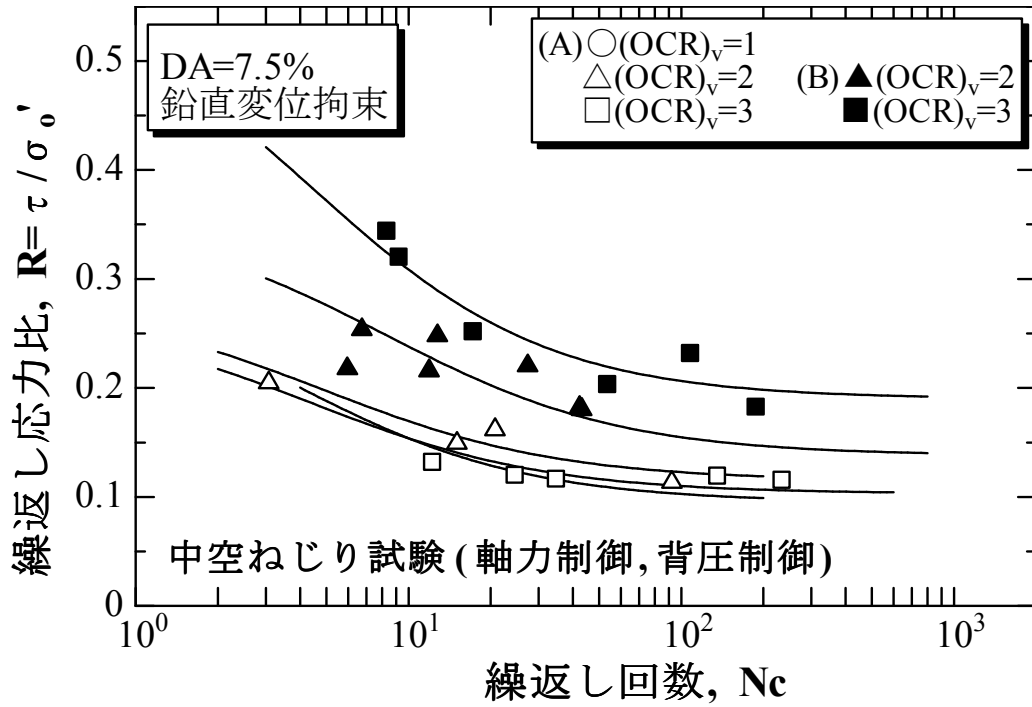


図 4-2 繰返し応力比  $\tau / \sigma'_0$  と繰返し回数 の関係 (ケース A, B)

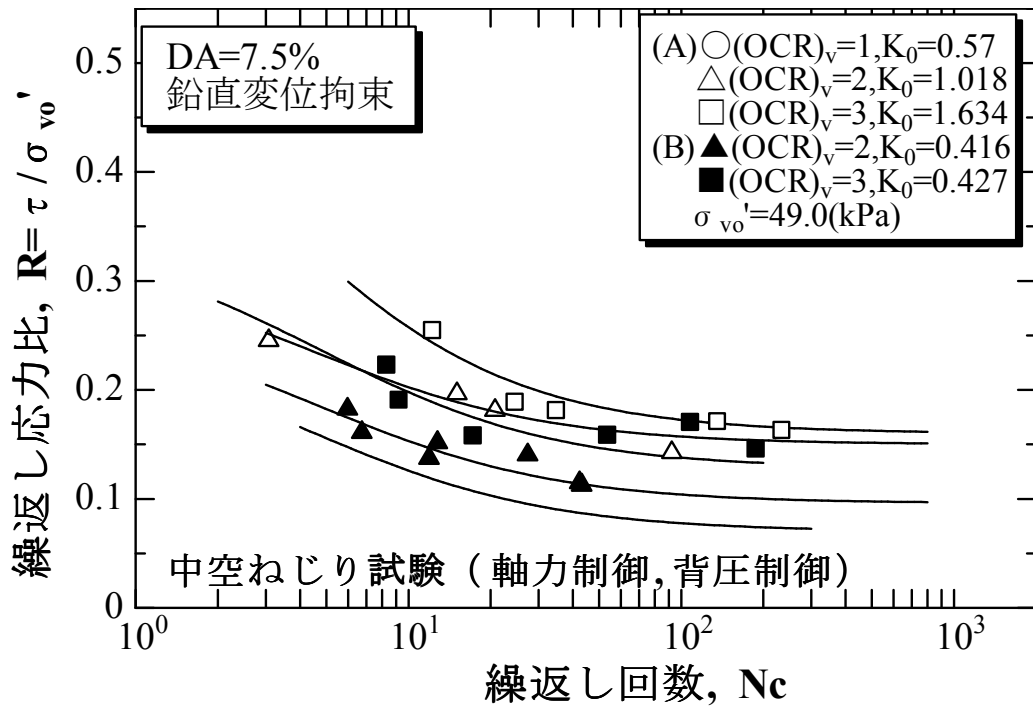


図 4-3 繰返し応力比  $\tau / \sigma'_{v0}$  と繰返し回数 の関係 (ケース A, B)

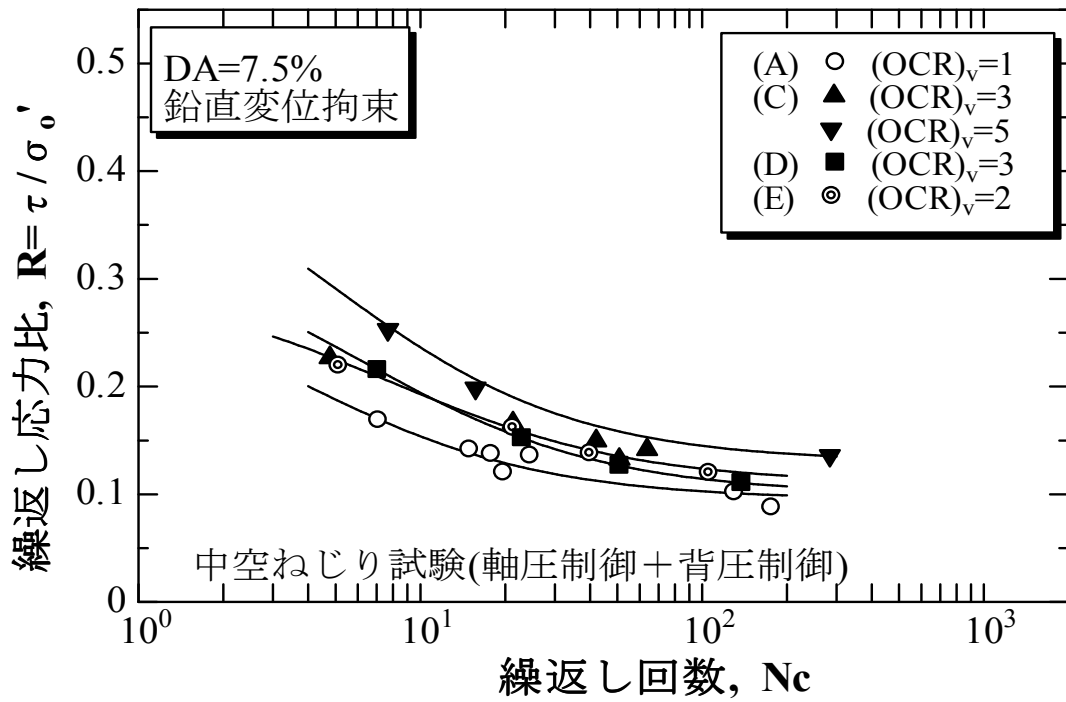


図 4-4 繰返し応力比  $\tau / \sigma_0'$  と繰返し回数との関係(ケース C~E)

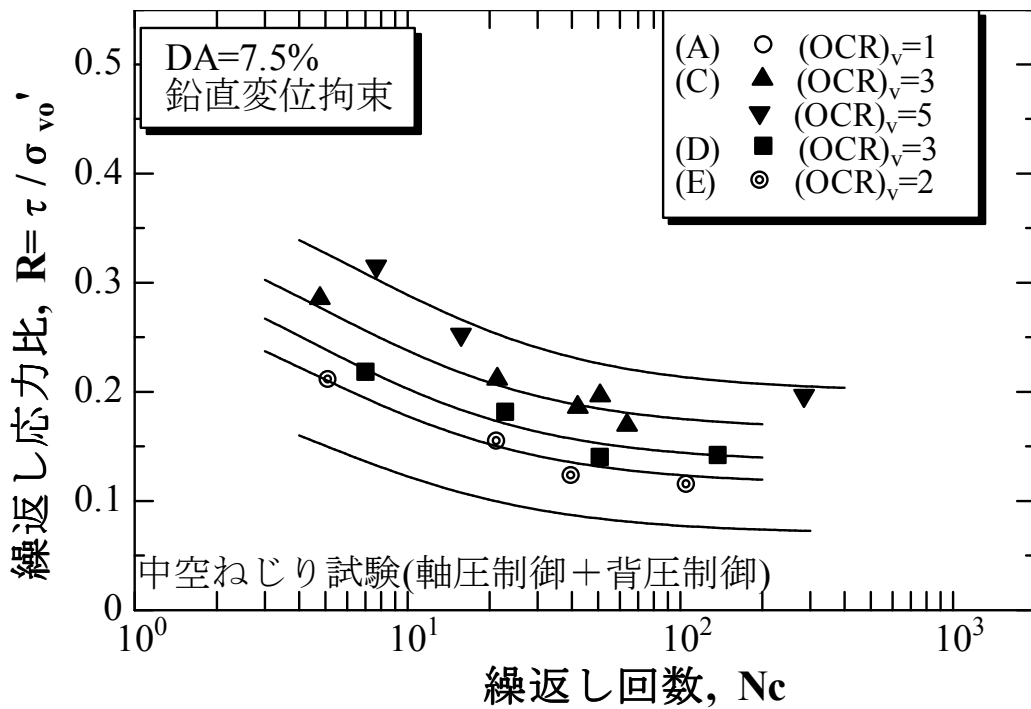


図 4-5 繰返し応力比  $\tau / \sigma_{v0}'$  と繰返し回数との関係(ケース C~E)

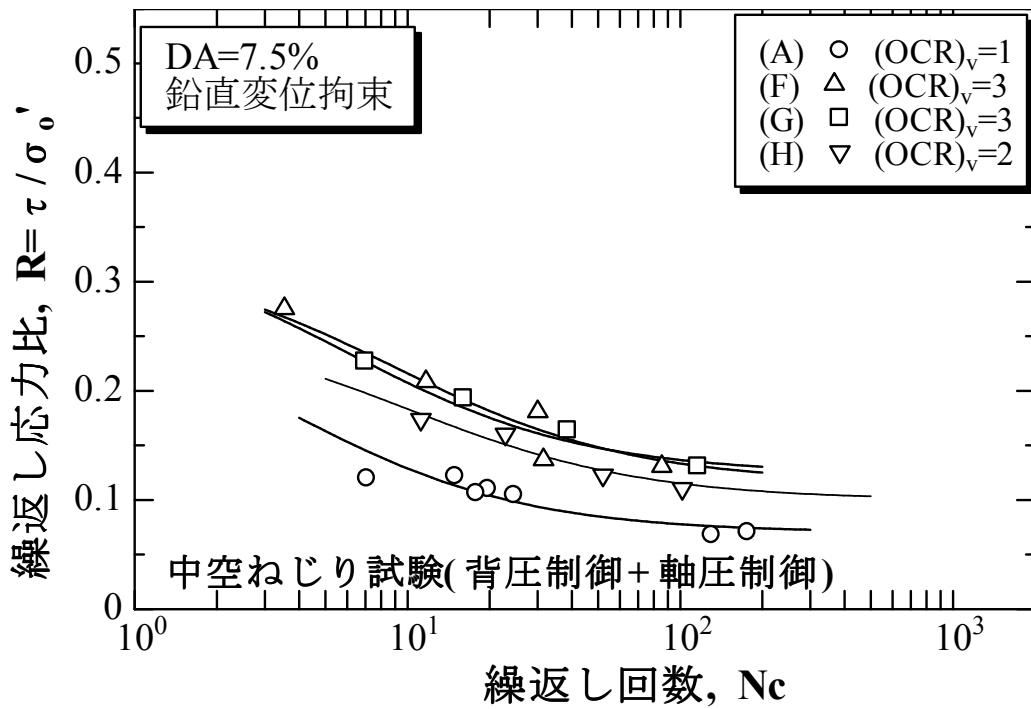


図 4-6 繰返し応力比  $\tau / \sigma'_0$  と繰返し回数との関係(ケース F~H)

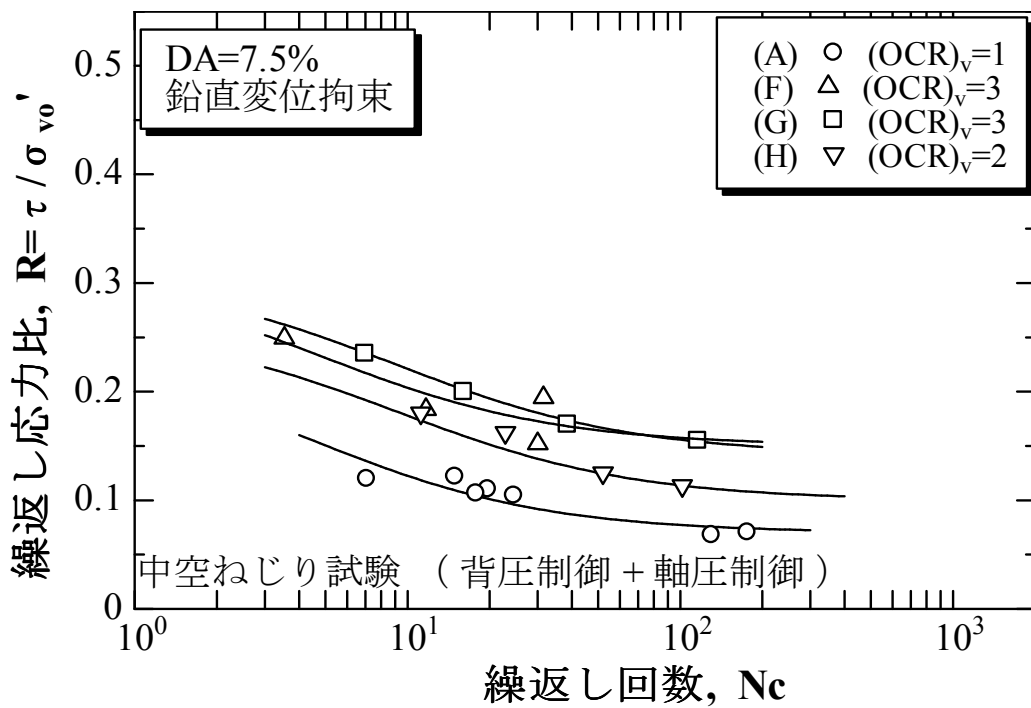


図 4-7 繰返し応力比  $\tau / \sigma'_{v0}$  と繰返し回数との関係(ケース F~H)

における繰返し応力比が最も大きく生じていることが確認できる。これは、ケース(D)と比較してみると、過圧密比は同等であるが、表 3-1 に示すように（表 3-1 では、ケース(E)とケース(F)の比較）過圧密後の  $K_0$  値に差があり、この  $K_0$  値の差が繰返し応力比  $R$  に関係しているものと推察される。次に、ケース(C)とケース(E)について比較してみると、 $K_0$  値においてはケース(E)の方が大きな値を示しているが、過圧密比(OCR)<sub>v</sub> がケース(C)において 3 なのに対し、ケース(E)では 2 であるため、過圧密効果が繰返し応力比  $R$  の差に関係しているものと推察される。

次に、図 4-6 においては、図 4-4 と同様にケース(F), (G), (H)においても比較対象とする軸圧制御で過圧密比(OCR)<sub>v</sub>=1 の結果よりも高い繰返し応力比を示している。また、図 4-6, 4-7 両図において、図 4-5 と同様、各ケースで比較すると過圧密後における  $K_0$  値の差、および過圧密比の違いに伴う過圧密効果によって、繰返し応力比  $R$  の増加傾向に相異が見られることが確認できる。

#### 4-4 まとめ

載荷盛土工法、地下水位低下工法およびそれらを組み合わせた場合を想定し、軸圧制御・背圧制御により過圧密履歴を受けた砂の液状化強度特性を検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. 繰返し応力比の分母に初期有効拘束圧  $\sigma_v'$  を用いると、軸圧制御では過圧密比の増加に伴う過圧密効果は確認できず、背圧制御ではその過圧密効果が確認できる。
2. 繰返し応力比の分母に初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  を用いると、軸圧制御・背圧制御共に過圧密比の増加に伴う過圧密効果が確認できる。
3. 組み合わせた場合、繰返し応力比の分母に初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  を用いると、全ケースにおいて過圧密後における  $K_0$  値の差による効果、過圧密比の増加に伴う過圧密効果が確認できる。



## 第5章 等方圧密および $K_0$ 圧密により長期圧密履歴を受けた砂の液状化試験

### 5-1 目的

砂地盤の液状化対策の一つとして過圧密を利用した工法があり、地盤に過圧密履歴を与える工法として、載荷盛土工法と地下水位低下工法が挙げられるが、盛土を構築する時間あるいは地下水位を低下させる時間の液状化強度に与える影響についてはまだ不明な点が多い。

そこで本章では、二重セル型中空ねじりせん断試験装置を用いて、等方圧密および載荷盛土工法、地下水位低下工法、およびそれらを組み合わせた場合を想定し、 $K_0$  圧密により長期間圧密された砂の液状化強度特性について調べた。

### 5-2 概要

本章の実験では、前章の実験と同様に空中落下法で相対密度  $Dr=45\%$  になるように供試体を作製し、二重セル型中空ねじりせん断試験装置を用い、等方圧密および  $K_0$  応力条件下で  $K_0$  圧密後、鉛直変位を拘束して繰返し載荷を行った。また、比較のため、豊浦砂 ( $Dr=45\%$ ) の実験も追加して行った。

実験ケースを表 5-1, 5-2 に示す。ここで圧密時間とは、ケース(A)~(D)、ケース(F)~(J)の場合、最大拘束圧を作用させた時間とし、ケース(E)の場合、載荷直前の鉛直有効応力、つまり初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49$  kPa まで軸圧制御により  $K_0$  圧密した状態で放置した時間とした。その後、前章にて繰返し応力比  $R$  が最も高い値を示した組み合わせ方法での応力履歴によって  $K_0$  圧密を行い、繰返しせん断試験を行った。ここで、ケース(E)において、表 5-1 に示す応力履歴を選んだのは、第3章で明らかになったように、このケースでは、圧密終了時の  $K_0$  値が大きく、液状化強度増加が顕著に現れると最も期待されるためである。また、ケース(K)では、簡易圧密装置（予圧密装置）を用いて、初期鉛直有効応力時に 1~720 時間まで圧密し、その後軸圧制御にて過圧密履歴を与えている。なお、背圧制御における過圧密比  $(OCR)_v=1$  での試験は軸力制御における過圧密比  $(OCR)_v=1$  での試験と全く同一のものである。

### 5-3 液状化強度に与える長期圧密効果について

#### 5-3-1 常陸那珂埋立砂の試験について

図 5-1 に等方圧密により長期圧密された過圧密比 1, 2 のケース (A), (B) についての繰返し応力比と  $DA=7.5\%$  に至るまでの繰返し回数の関係をそれぞれ示す。

ケース (A) の過圧密比 1 の場合、圧密時間が長くなるほど液状化強度は大きくなっていることが確認できる。これは、時間の経過につれて粒子構造の安定化が明確に現れたの

表 5-1 実験ケース 1 (常陸那珂埋立砂)

ケース	応力履歴	過圧密比(OCR) <sub>v</sub>	圧密時間
(A)	等方圧密	1	1hr
			24hr
			72hr
		2	1hr
			24hr
			72hr
(B)	等方圧密	2	(OCR) <sub>v</sub> =1,72hr→(OCR) <sub>v</sub> =2,1hr
(C)	軸圧制御	1	24hr
			72hr
			24hr
		2	72hr
			24hr
			72hr
(D)	背圧制御	2	24hr
			72hr
(E)	軸圧載荷⇒	3	1hr
	背圧減少⇒		24hr
	背圧増加⇒		72hr
	軸圧除荷		160hr

表 5-2 実験ケース 2 (豊浦砂)

ケース	圧密方法	過圧密比	圧密時間
(F)	等方圧密	1	1,24,72hr
(G)	等方圧密	2	1,24,72hr
(H)	K <sub>0</sub> 圧密 (軸圧制御)	1	1,24,72hr
(I)	K <sub>0</sub> 圧密 (軸圧制御)	2	1,24,72hr
(J)	K <sub>0</sub> 圧密 (背圧制御)	2	1,24,72hr
(K)	K <sub>0</sub> 圧密 (軸圧制御)	2	1,24,72, 160,720hr

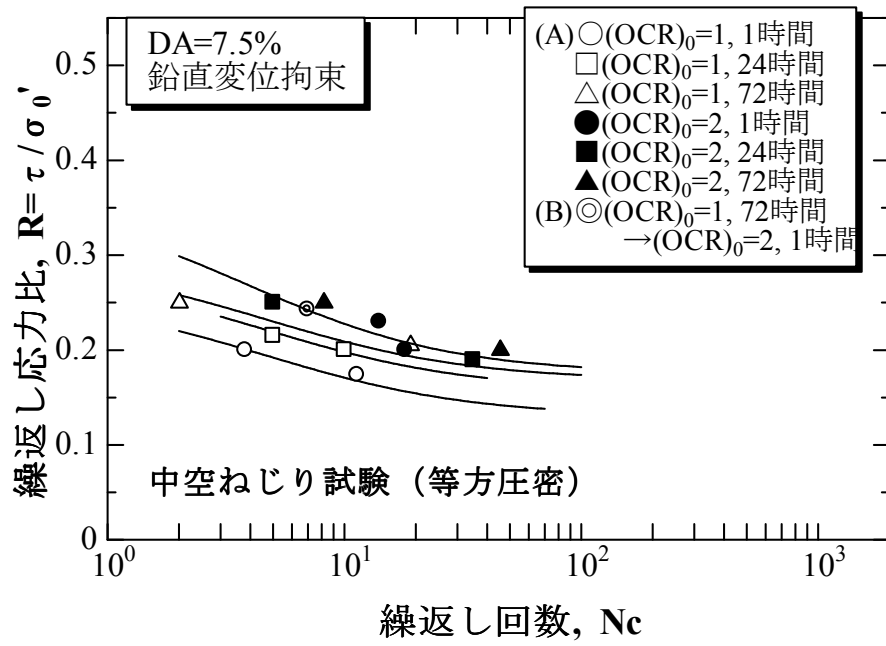


図 5-1 ケース (A), (B)

ではないかと推察される。過圧密比 2 の場合は、圧密時間を 3 通りに変えても液状化強度の明確な差異は見られない。また、過圧密比 1 で 72 時間長期圧密後、過圧密比 2 で過圧密したケース (A) ではケース (B) の過圧密比 2 の繰返し応力比と変わらない結果を示したが、ケース (A) の過圧密比 1 の 72 時間と比較すると若干高い値を示した。特に、前者の挙動については、データ数が少ないため、今後もさらに検討する必要がある。

図 5-2,5-3 に  $K_0$  圧密による長期圧密された過圧密比 1, 2 のケース (C), (D) についての繰返し応力比と繰返し回数の関係をそれぞれ示す。ここでは繰返し応力比の分母を前章で過圧密効果を確認できた初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  とする。

図 5-2 のように等方圧密の結果と異なり、軸圧制御の過圧密比 1 において長期圧密の効果が現れていない。これは、軸圧制御で軸圧を載荷した場合、等方圧密とは異なり、ほぼ鉛直方向のみに圧密が行われることにより等方圧密に比べ供試体内の粒子構造の安定化が短時間に進んだためではないかと思われる。また、図 5-2,5-3 において軸圧制御、背圧制御の過圧密比 2 では等方圧密と同様の長期圧密効果を確認することができなかった。この条件下で長期圧密効果が見られないのは、圧密時間が最大拘束圧を作用させた時間、つまり供試体に作用する応力が最も大きい時として長時間圧密しているため、この場合も粒子構造が早期に安定してしまったのではないかと推察される。このことから、最大拘束圧を作用させる前の段階で長期圧密を行い、その後本研究の目的としている過圧密履歴を与えて長期間圧密された地盤における過圧密効果について調べることにした。

図 5-4 に  $K_0$  圧密により長期圧密されたケース (E) についての繰返し応力比  $R$  と  $DA=7.5\%$  に至るまでの繰返し回数との関係を示す。ここで、前述した圧密時間については、1 時間、24 時間、72 時間、と変化させて実験を行っている。また、繰返し応力比  $R$  は、前章によって過圧密効果が確認されたことから、せん断応力  $\tau$  を初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  つまり 49 kPa で除した値を用いている。

図において、1 時間、24 時間、72 時間、160 時間と圧密時間が長期になるにつれて、繰返し応力比  $R$  が増加している、つまり長期圧密効果が確認できる。これは、圧密時間の経過に伴って供試体内の粒子構造が安定化していく現象が明確に現れているのではないかと推察される。しかしその中で、圧密時間 1 時間から 24 時間、24 時間から 72 時間、72 時間から 160 時間と比較してみると、繰返し応力比  $R$  の増加が圧密時間に比例せず、長期圧密効果による繰返し応力比の増加が少なくなっていることが確認できる。これは、圧密時間と定義している初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49$  kPa まで軸圧制御により  $K_0$  圧密した状態において、時間の経過に伴い粒子構造の安定化の進行具合が次第に鈍化して、長期圧密効果も次第に生じにくくなっているものと推察される。そのため、時間が経過するにつれて必ずしも繰返し応力比の増加が期待できるとは限らないと考えられる。しかし、圧密時間 160 時間における実験データが他のケースに比べて十分なデータ数を有していないため、今後他のケースも含めてデータ数を増やし考察が必要である。また、長期圧密効果が期待できなくなるという見解についても、今後さらに長期的な圧密を施すことで確認する必要があると考えられる。

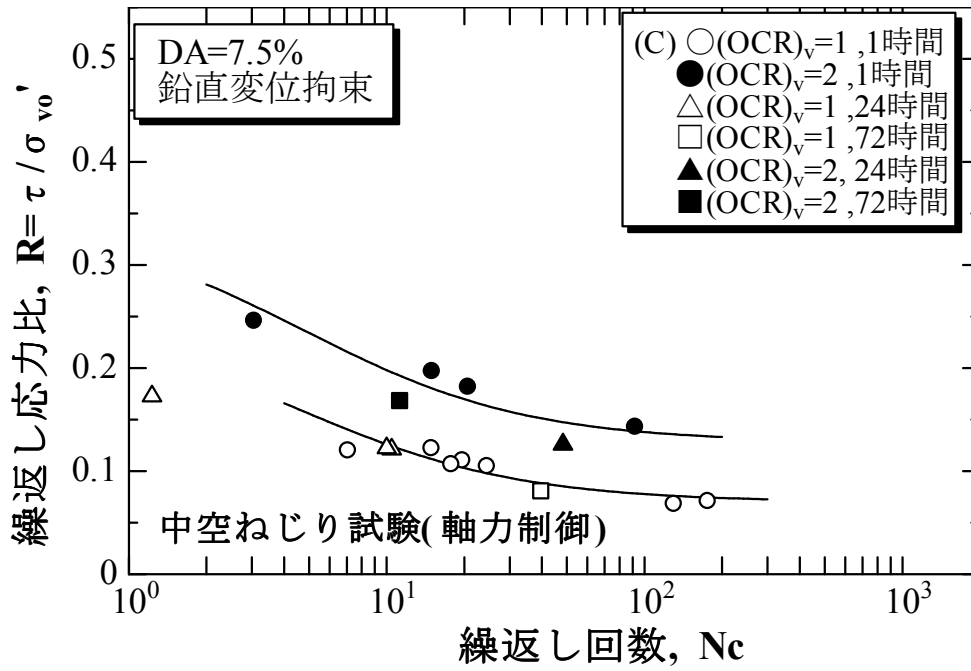


図 5-2 ケース (C)

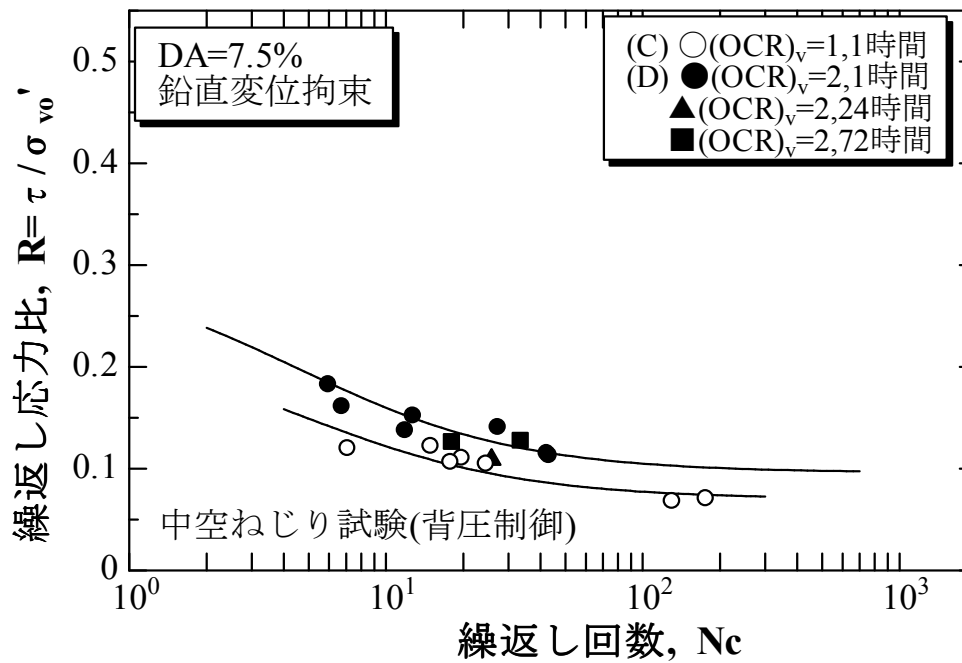


図 5-3 ケース (C) , (D)

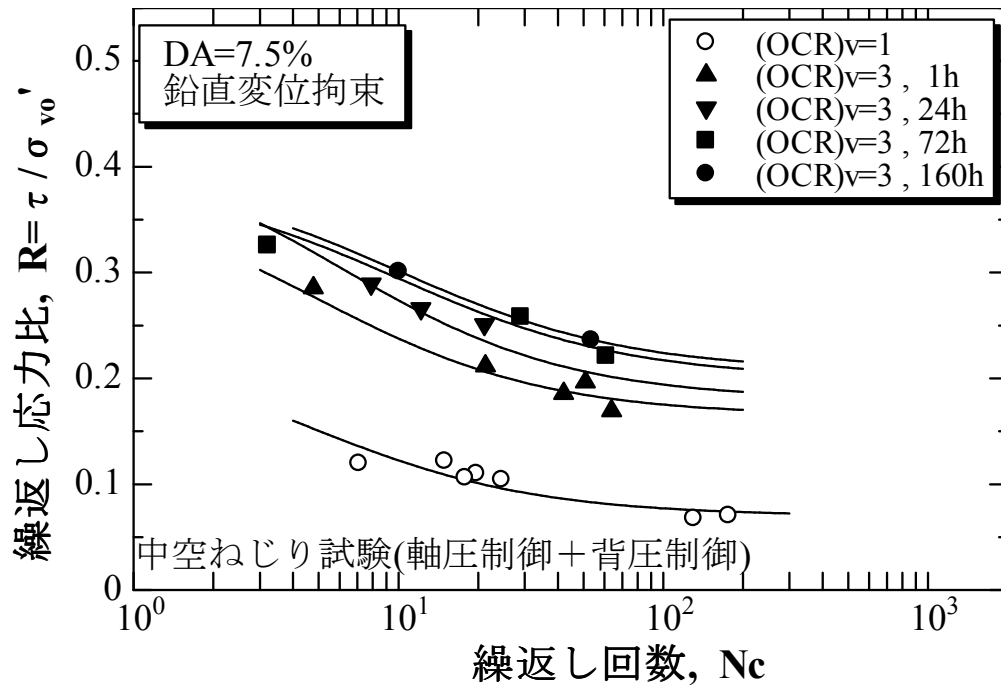


図 5-4 繰返し応力比  $\tau / \sigma'_{v0}$  と繰返し回数の関係(ケース E)

### 5-3-2 豊浦砂の試験について

図 5-5, 5-6 に等方圧密のケース (F), (G) での繰返し応力比  $\tau / \sigma_v'$  と両振幅せん断ひずみ  $DA=7.5\%$  に至るまでの繰返し回数  $N_c$  の関係をそれぞれ示す。ここで、繰返し応力比の分母は初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  としている。過圧密比 1 の場合、圧密時間が長くなるほど繰返し応力比は大きくなっていることが確認できる。これは、時間の経過とともに粒子構造の安定化が明確に現れたからと推察される。過圧密比 2 の場合、圧密時間を変えても繰返し応力比に明確な差異は見られない。これは、最大鉛直有効応力が作用している状態から初期鉛直有効応力が作用している状態に移行したことで、長期圧密によって得られた液状化強度増加の効果が失われ、その代わりに過圧密の効果が大きくなり、その影響が支配的になったためであると推察される。また、過圧密比 1 で 72 時間圧密したケースでは、過圧密比 2 の場合よりも繰返し応力比は若干小さいという結果を示した。

図 5-7, 5-8 に  $K_0$  圧密のケース (H), (I), (J) での繰返し応力比  $\tau / \sigma_{v0}'$  と両振幅せん断ひずみ  $DA=7.5\%$  に至るまでの繰返し回数  $N_c$  の関係をそれぞれ示す。ここでも、繰返し応力比の分母は初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  としている。過圧密比 1 のとき、等方圧密の場合と同様に圧密時間が長くなるほど繰返し応力比が大きくなっていることが確認できる。これも、時間の経過に伴い粒子構造の安定化が現れたからと推察される。過圧密比 2 のときは等方圧密の場合と同様に圧密時間を変えても繰返し応力比に差異は見られなかった。これも、最大鉛直有効応力から初期鉛直有効応力に除荷したことにより、長期圧密によって得られた液状化強度増加の効果が代わって過圧密の効果が現れたためであると推察される。また、 $K_0$  圧密の過圧密比が 2 の場合において軸圧制御と背圧制御の結果を比較すると、軸圧制御の方が背圧制御よりも液状化強度の増加が大きいことも確認できる。

図 5-9 に  $K_0$  圧密のケース (K) での繰返し応力比  $\tau / \sigma_{v0}'$  と両振幅せん断ひずみ  $DA=7.5\%$  に至るまでの繰返し回数  $N_c$  の関係を示す。長期間圧密した後に過圧密履歴を与えた場合、3 日までの時間の経過で、圧密時間が長いほど繰返し応力比が大きいことが確認できる。さらに圧密時間を長くすると、1 週間と 1 ヶ月の間に繰返し応力比はわずかであるが増加していることが確認できる。これは、圧密開始から早い段階で粒子構造の安定化が大きく進行しているためと考えられる。ただし、粒子構造の安定化は徐々にではあるが、さらに進行すると考えられるため、これらについてはさらにデータ数を増やして検討する必要がある。

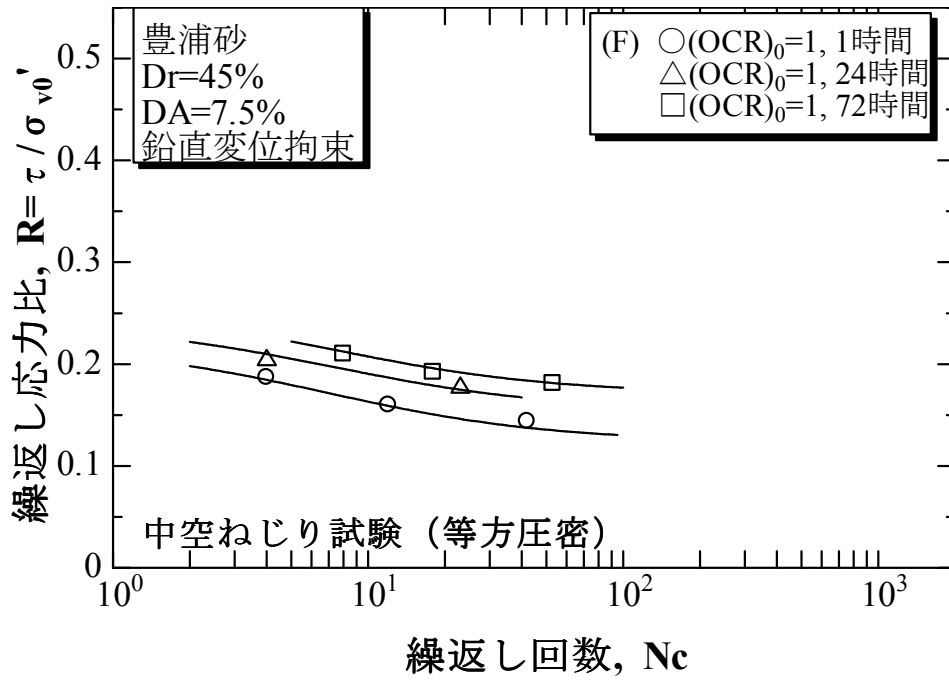


図 5-5 繰返し応力比と繰返し回数の関係  
(ケース F)

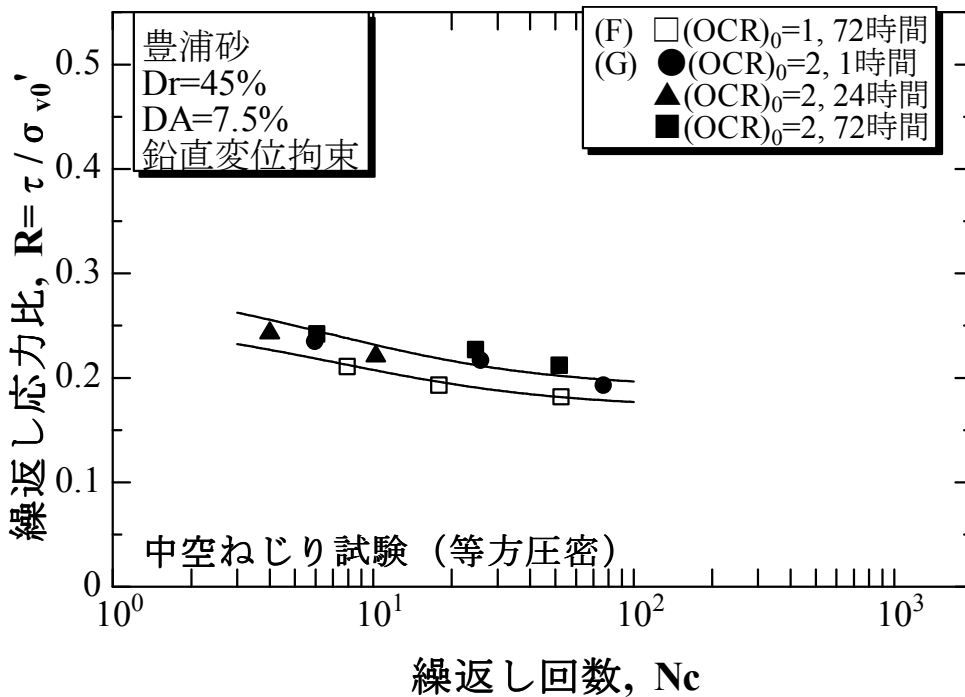


図 5-6 繰返し応力比と繰返し回数の関係  
(ケース F,G)



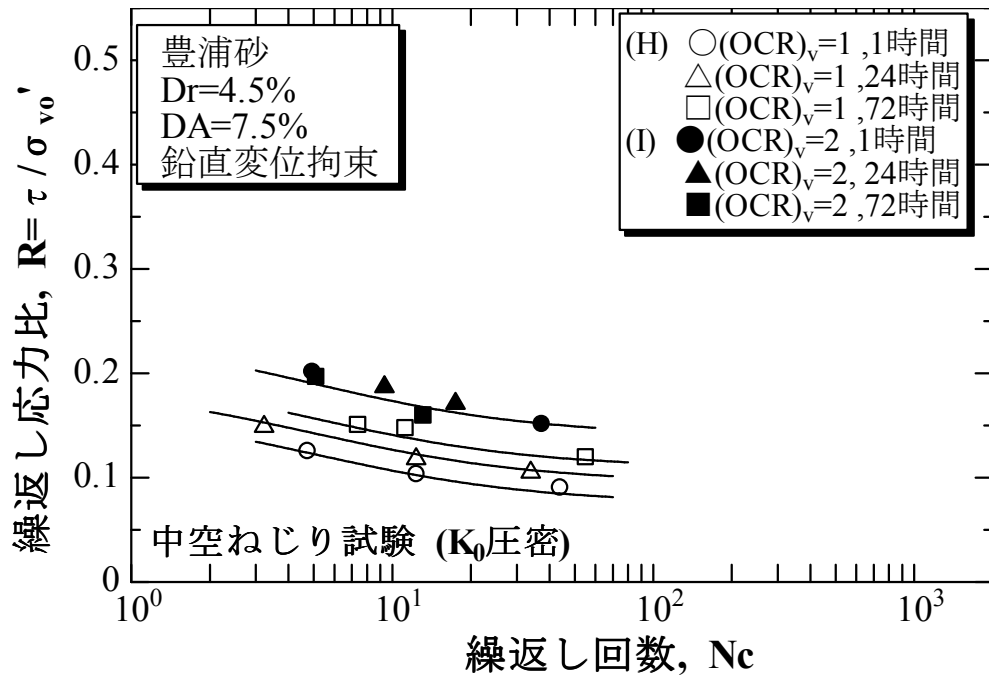


図 5-7 繰返し応力比と繰返し回数の関係  
(ケース H,I)

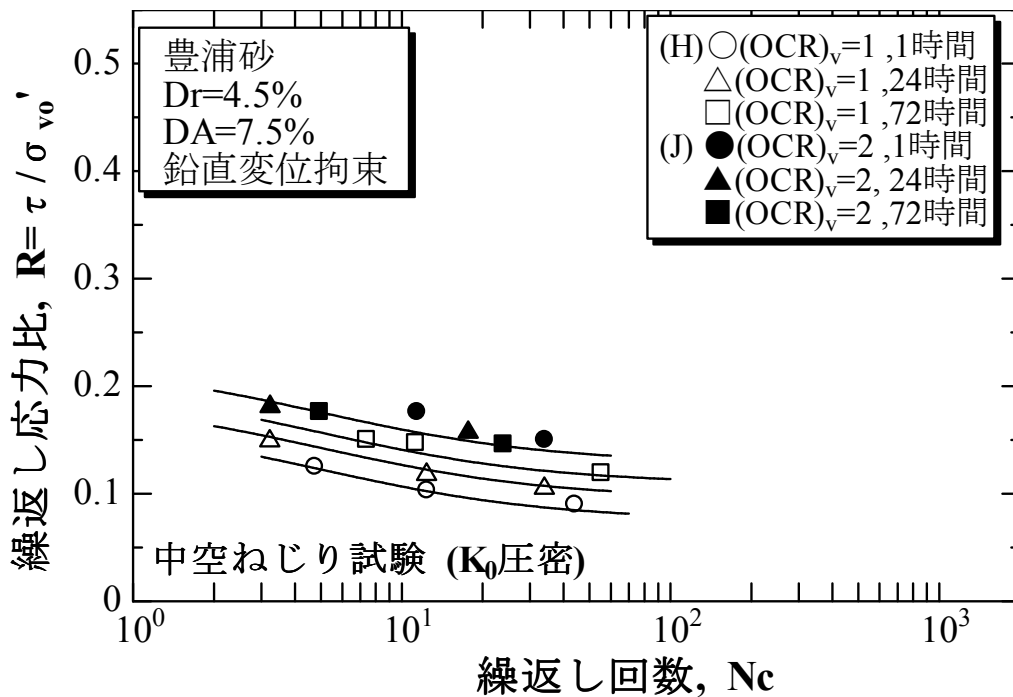


図 5-8 繰返し応力比と繰返し回数の関係

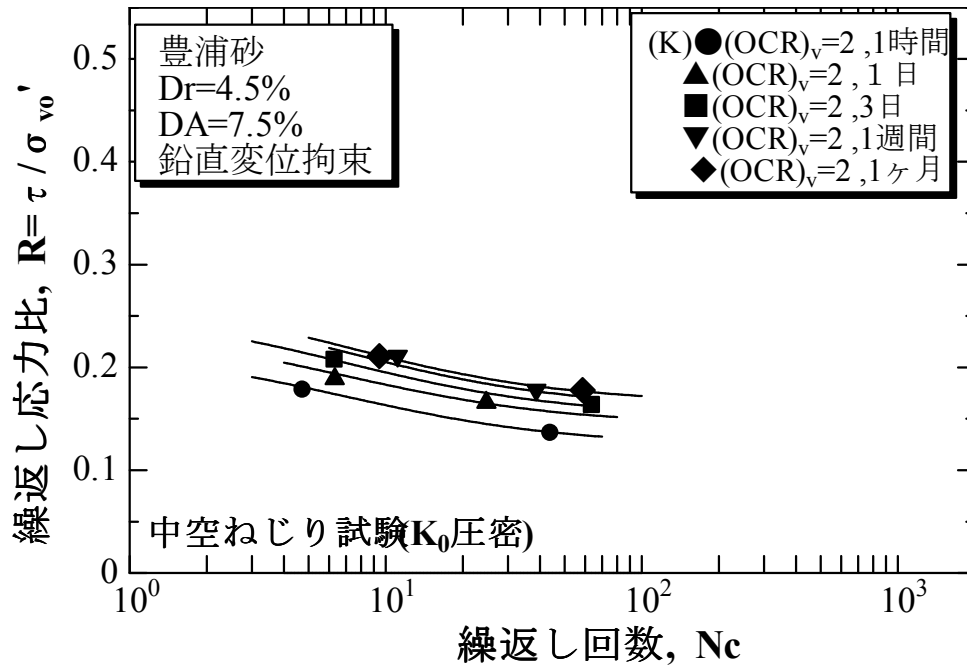


図 5-9 繰返し応力比と繰返し回数の関係  
(ケース K)

#### 5-4 まとめ

二重セル型中空ねじり試験装置を用い、等方圧密および載荷盛土工法、地下水位低下工法およびそれらを組み合わせた場合を想定した  $K_0$  圧密により長期間圧密し、軸圧制御・背圧制御により過圧密履歴を与えた砂の液状化強度特性を検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. 等方圧密では過圧密比 1 の状態で長期圧密した場合、液状化強度の増加が期待できる。
2.  $K_0$  圧密では過圧密比 1 の状態で長期圧密した場合、常陸那珂埋立砂では液状化強度の増加はほとんど期待できないが、豊浦砂では液状化強度の増加が期待できる結果となった。この原因については、試料の物理的性質に関係があると考えられるが、さらに検討する必要がある。
3. 等方圧密および  $K_0$  圧密において過圧密比 2 の状態で長期圧密した場合、液状化強度の増加は期待できない。
4. 圧密時間を初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49 \text{ kPa}$  まで軸圧制御により  $K_0$  圧密した状態で放置する時間と定義した場合、長期圧密されたことによる液状化強度の増加が期待できる。

## 第6章 K<sub>0</sub>圧密により過圧密履歴を受けた砂の液状化強度増加率の比較

### 6-1 目的

これまでの章で、載荷盛土工法、地下水位低下工法およびそれらを組み合わせた工法における応力履歴を再現し、二重セル型中空ねじり試験装置を用いて、水平地盤内の応力・変形状態を再現する K<sub>0</sub> 圧密下での過圧密砂の液状化試験を実施し、K<sub>0</sub> 圧密における K<sub>0</sub> 値の挙動および液状化強度特性について調べた。

そこで本章では、それぞれの工法によって過圧密された砂の液状化強度増加率を比較することにより、それぞれの過圧密効果の比較・検討を行った。

### 6-2 概要

実験ケースは表 4-1 に示している。ケース(A)～(H)における繰返し試験の結果、図 4-3, 4-5, 4-7 から繰返し回数 20 回での繰返し応力比 R を読み取り、その値を液状化強度比 R<sub>120</sub> とみなし、過圧密比(OCR)<sub>v</sub>=2, 3, 5 での R<sub>120</sub> を(OCR)<sub>v</sub>=1 での R<sub>120</sub> で除した値を液状化強度増加率(R<sub>OC</sub>)<sub>v</sub> と定義して、液状化強度増加率(R<sub>OC</sub>)<sub>v</sub> と過圧密比(OCR)<sub>v</sub> の関係を示したのが図 6-1～6-3 である。また、算定式より導いた液状化強度増加率と過圧密比(OCR)<sub>v</sub> の関係も図にプロットしている。

なお、ここで両者の関係を(R<sub>OC</sub>)<sub>v</sub>=(OCR)<sub>v</sub><sup>n</sup>の式で表し、実験値と比較した。

### 6-3 算定方法

K<sub>0</sub> 値と過圧密比 OCR による液状化強度の算定方法は、石原ら(1979)の研究で要素試験により導かれている。そこで、今回行った実験についても、液状化強度比 R<sub>120</sub> と過圧密比 OCR および K<sub>0</sub> 値の関係を定式化することによって液状化強度増加率(R<sub>OC</sub>)<sub>v</sub> を表し、軸圧制御、背圧制御およびそれらを組み合わせた場合について過圧密効果の検討を行った。ここで液状化強度増加率(R<sub>OC</sub>)<sub>v</sub> を式で表すと、

$$(R_{OC})_v = \frac{(\tau / \sigma_{v0}')_{A,OC}}{(\tau / \sigma_{v0}')_{A,NC}} = \frac{1 + 2(K_0)_{OC}}{1 + 2(K_0)_{NC}} \cdot \frac{(\tau / \sigma_0')_{OC}}{(\tau / \sigma_0')_{NC}} \quad \dots (1)$$

となる。ここで式(1)の右辺第 2 項は、n の値に等方圧密により過圧密履歴を受けた場合の値を用い、平均有効主応力で表す過圧密比(OCR)<sub>0</sub> の n 乗に比例すると仮定している。その仮定の下に式(1)を変形すると、

$$(R_{OC})_v = \frac{1 + 2(K_0)_{OC}}{1 + 2(K_0)_{NC}} (OCR)_0^n \quad \dots (2)$$

と表すことができる。よって、式(2)より各実験ケースにおける液状化強度増加率(R<sub>OC</sub>)<sub>v</sub> を算出し、液状化強度に与える過圧密効果の評価を行う。なお、n の値は、常陸那珂砂の場合、繰返し三軸

試験を実施した結果より 0.50 となっている。

#### 6-4 液状化強度増加率の比較

図 6-1 にケース(A), (B)の液状化強度増加率 $(R_{oc})_v$ と過圧密比 $(OCR)_v$ の関係を示す。図より、ケース(A), (B)の  $n$  の値は 0.70、0.50 となり、背圧制御よりも軸圧制御における  $n$  の値が大きいことが確認できる。これは、軸圧制御では鉛直方向に大きく過圧密されることになり、粒子構造が安定しやすく、また  $K_0$  値が大きくなると推察されるが、背圧制御の場合、鉛直方向・水平方向共に等方的に過圧密されるため、粒子構造の安定化が軸圧制御のときに比べて顕著には現れないと推察される。そのため、背圧制御よりも軸圧制御において  $n$  の値が大きくなったものと推察される。

次に算定値と実験値を比較すると、ケース(A)の軸圧制御による過圧密比 $(OCR)_v=3$ において、実験値が算定値より小さい値を示している。これは、圧密終了後の  $K_0$  値にばらつきが生じたため、実験値に影響を及ぼしたものと推察される。

次に、図 6-2, 6-3 はケース(C)~(E)、(F)~(H)における液状化強度増加率 $(R_{oc})_v$ と過圧密比 $(OCR)_v$ の関係を示したものである。全てのケースにおいて  $n$  の値は 0.50~0.66 であり、軸圧制御・背圧制御を単独で行った場合の中間の値を示していることが確認できる。ただし、ケース(C)の過圧密比 $(OCR)_v=5$ の場合において、 $(OCR)_v=3$ の場合に比べ液状化強度増加率が高い値を示しているが、 $(OCR)_v=3$ から 5 での液状化強度の増分は $(OCR)_v=3$ 以前のその増分に比べて大きくなっていない。これは、過圧密過程において $(OCR)_v=5$ 以前に粒子構造の安定化がほぼ完了し、そのため $(OCR)_v$ の増加に伴う過圧密効果の増加が小さくなり、 $(R_{oc})_v=(OCR)_v^n$ の関係が成立しなくなったのではないかと推察される。この傾向は他のケースで $(OCR)_v=5$ の実験を行えば、同様に起こり得ると考えられる。

次に算定値と実験値を比較すると、両者の値はほぼ同程度の液状化強度増加率を示している。また、ケース(C)の過圧密比 $(OCR)_v=5$ では実験値が算定値よりも小さな値を示していることが確認できる。これは前述したように、粒子構造の安定化が過圧密比 5 以前にほぼ完了しているため、実験における過圧密効果が小さく現れたものと推察される。また、ケース(C)~(H)において、ほぼすべてのケースで実験値が算定値を多少下回っている。これも軸圧制御同様、圧密終了後における  $K_0$  値のばらつきによるものと推察される。

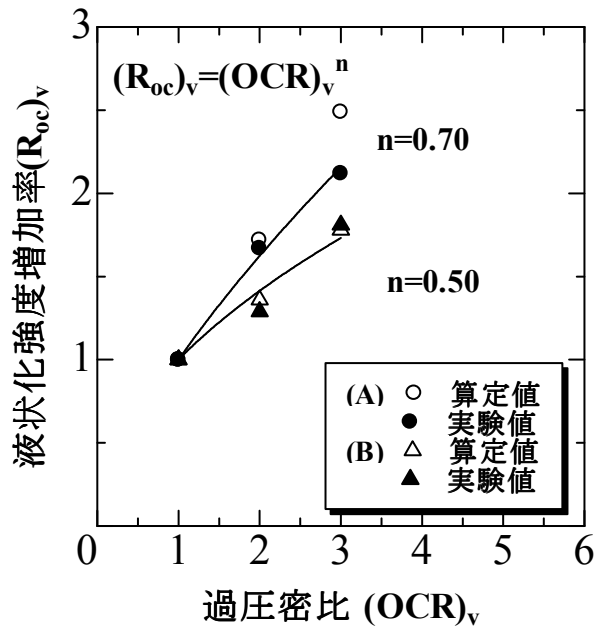


図 6-1 液状化強度増加率と過圧密比の関係  
(ケース A, B)

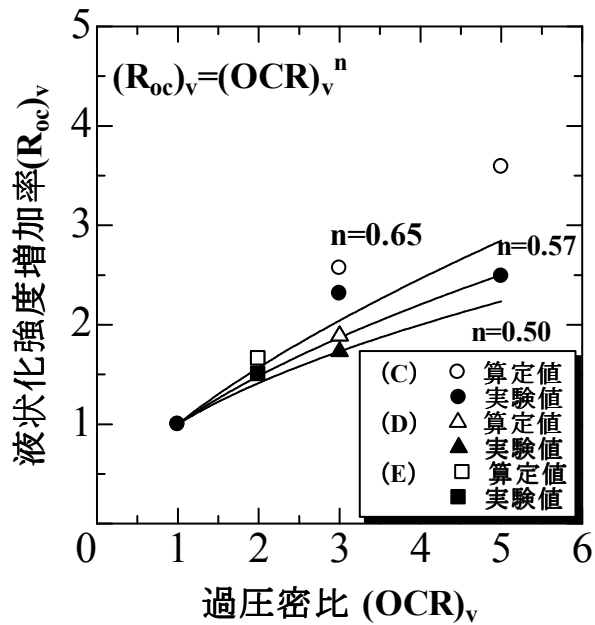


図 6-2 液状化強度増加率と過圧密比の関係  
(ケース C~E)

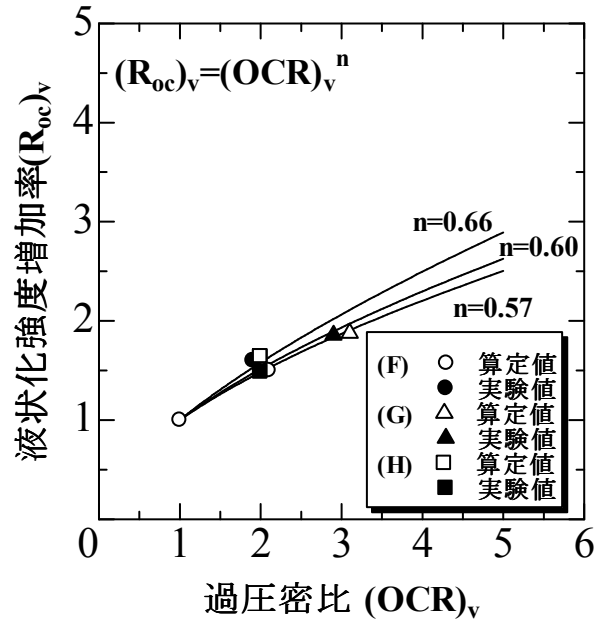


図 6-3 液状化強度増加率と過圧密比の関係  
(ケース F~H)

## 6-5 まとめ

載荷盛土工法、地下水位低下工法およびそれらを組み合わせた工法を想定し、軸圧制御・背圧制御により過圧密履歴を与えた砂の液状化強度増加率を比較することにより、過圧密効果の比較・検討を行った結果、以下のようなことが明らかになった。

1.  $(R_{oc})_v = (OCR)_v^n$  のように近似すると載荷盛土工法、地下水位低下工法の  $n$  の値はそれぞれ 0.70、0.50 となった。
2. 液状化強度増加率においては、2 種類の工法を組み合わせた場合の全ケースで、 $n$  の値が 0.50~0.66 であり、軸圧制御および背圧制御を単独で行った場合の中間にある。
3.  $K_0$  応力条件下において、過圧密比  $(OCR)_v$  の値が 1 から 3 の場合では液状化強度増加率を

$$(R_{oc})_v = \frac{(\tau/\sigma_{v0}')_{A,OC}}{(\tau/\sigma_{v0}')_{A,NC}} = \frac{1+2(K_0)_{OC}}{1+2(K_0)_{NC}} \cdot (OCR)_0^n$$

で表すことができる。



## 第7章 等方圧密および $K_0$ 圧密により長期圧密履歴を受けた砂の液状化強度増加率

### 7-1 目的

載荷盛土工法、あるいは地下水位低下工法を地盤に適用する際の問題点として、盛土を構築する時間、あるいは地下水位を低下させる時間が液状化強度の増加に与える影響について明らかになっていない点が多いことが挙げられる。そのため、これまでの章において二重セル型中空ねじりせん断試験装置を用い、両工法を組み合わせた場合を想定し、長期間、過圧密履歴を受けた場合、および長期圧密後に過圧密履歴を受けた場合の液状化試験を実施した。

そこで本章では、載荷盛土工法、地下水位低下工法、およびそれらを組み合わせた場合を想定し、 $K_0$  圧密により長期圧密後に過圧密された砂の液状化強度増加率を比較することで長期圧密効果の比較、検討を行った。

### 7-2 概要

本章の実験では、これまでの章の実験と同様に、空中落下法で相対密度  $Dr=45\%$  となるように供試体を作製し、二重セル型中空ねじりせん断試験装置を用いて  $K_0$  応力条件下で  $K_0$  圧密後、鉛直変位を拘束して繰返し載荷を行った。また、比較のため、豊浦砂 ( $Dr=45\%$ ) の実験も追加して行った。

実験ケースは表 5-1, 5-2 に示している。ここで圧密時間とは、載荷直前の鉛直有効応力、つまり初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49$  kPa まで軸圧制御により  $K_0$  圧密し、そのまま放置した時間である。その後、軸圧制御および、軸圧制御と背圧制御を組み合わせることによって過圧密履歴を与えた。また前章と同様に、図 5-4, 5-9 における繰返し回数 20 回での繰返し応力比  $R$  を液状化強度比  $R_{120}$  とみなし、各圧密時間での  $R_{120}$  を圧密時間 1 時間での  $R_{120}$  で除した値を長期圧密による液状化強度増加率と定義した。

### 7-3 長期圧密履歴が液状化強度増加率に与える影響の比較

#### 7-3-1 常陸那珂埋立砂の試験について

図 7-1 に  $K_0$  圧密により長期圧密されたケース(E)における液状化強度増加率と圧密時間の関係を示す。図において、圧密時間が 1 時間、24 時間、72 時間、160 時間と長期間に及ぶにつれて液状化強度増加率が大きくなっていることが確認できるが、圧密時間 24 時間から 72 時間、72 時間から 160 時間においては、圧密時間が 1 時間から 24 時間と比べて長期間になっているにも拘わらず、液状化強度の増加が小さくなっている。

続いて図 7-2, 7-3 には  $K_0$  圧密による体積変化率と圧密時間の関係を示す。図 7-2 はケース(C), (D)の結果について、図 7-3 はケース(E)の結果について示している。ここ

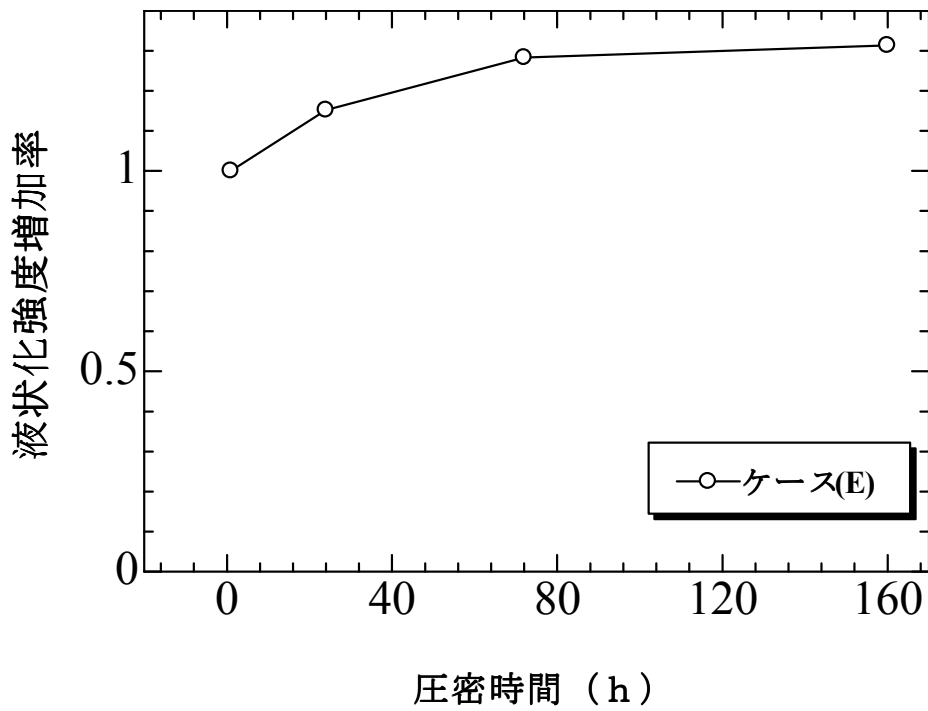


図 7-1 液状化強度増加率と圧密時間の関係(ケース E)

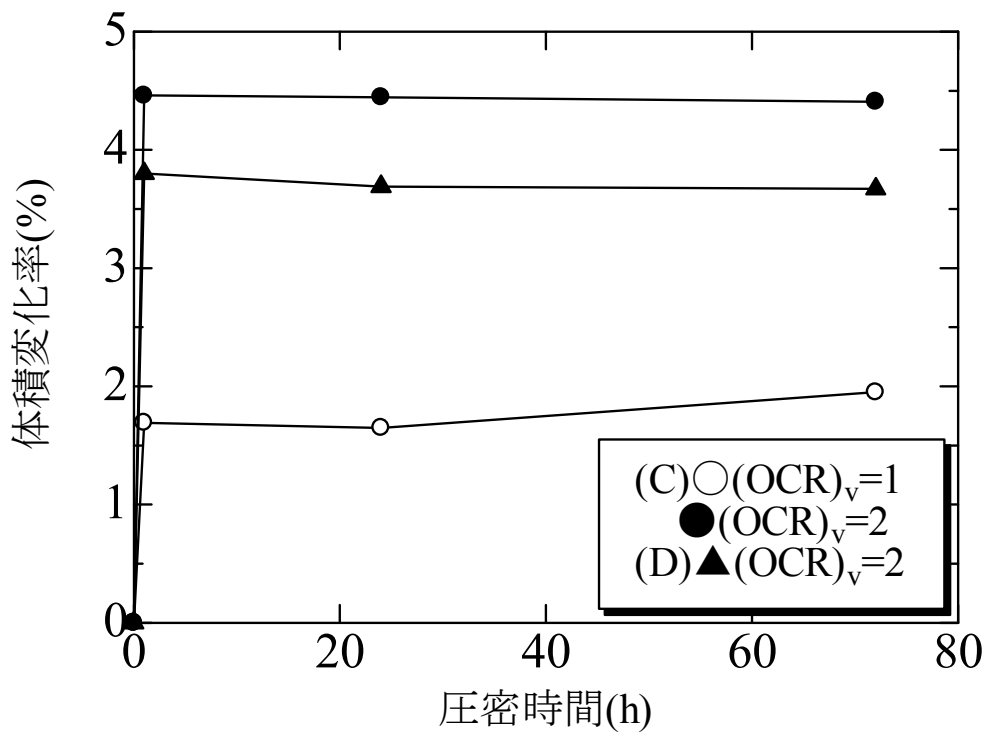


図 7-2 体積変化率と圧密時間の関係 (ケース C, D)

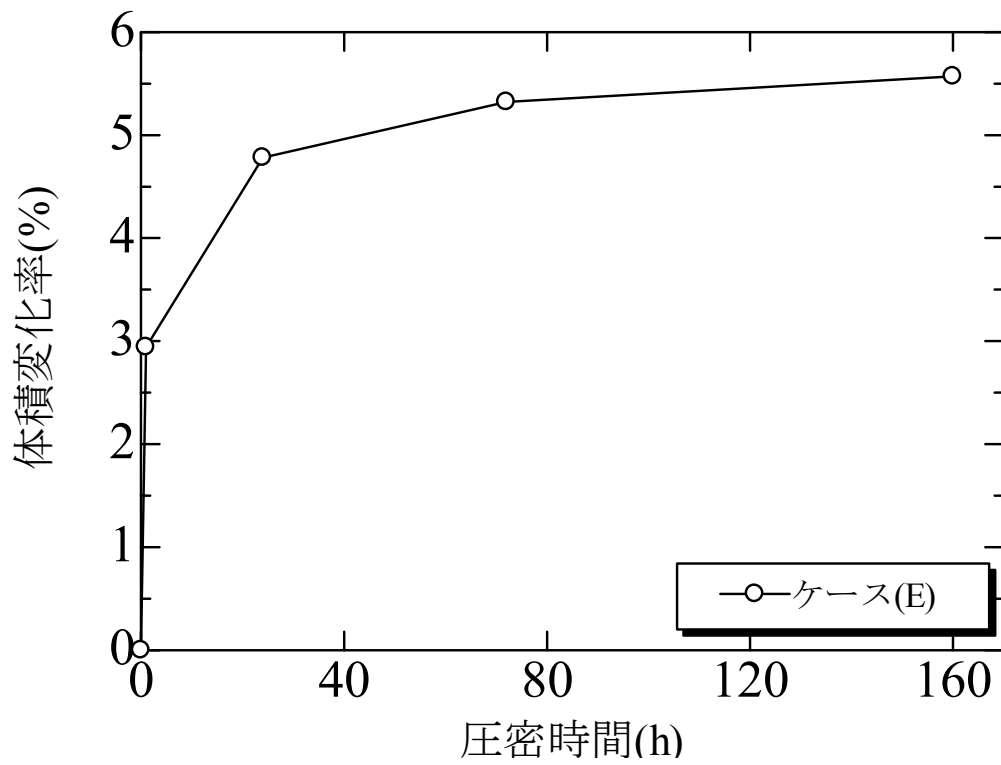


図 7-3 体積変化率と圧密時間の関係 (ケース E)

で体積変化率とは、ビューレット内の排水量を供試体体積で除した値であり、その間に発生した体積ひずみの値を表す。図 7-2 において、制御方法、過圧密比に拘わらず、1 時間から 72 時間までの体積ひずみは、1 時間までの体積ひずみに比べて極めて小さいことが確認できる。軸圧制御の場合、ほぼ鉛直方向のみに圧密が行われることによって、1 時間までの体積ひずみが大きく生じている。これより、軸圧制御においては供試体内の粒子構造の安定化が短期間に進み、長期圧密の効果が現れなかったものと推察される。また、背圧制御においても軸圧制御同様、異方応力状態にあるため体積ひずみが大きく生じたものと推察される。次に、図 7-3 においては、圧密時間 1 時間までの体積ひずみが大きく生じ、その後 1 時間から 24 時間、24 時間から 72 時間、72 時間から 160 時間の間においても体積ひずみが生じている。しかし、圧密時間の経過につれて体積ひずみの変化量は減少していることが確認できる。これは、第 5 章で述べたように、圧密時間と定義している初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49$  kPa まで軸圧制御により  $K_0$  圧密した状態において、時間の経過に伴い粒子構造が徐々に安定しているためではないかと推察される。そのため、図 7-1 からも分かるように、長期圧密効果による液状化強度の増加が圧密時間の経過に伴って次第に小さくなったものと推察される。

これらのことから、160 時間以上の圧密時間の場合、液状化強度の増加が期待できるとは限らないと推察される。しかし、現段階では圧密時間 160 時間の場合のデータ数が十分でないことや、さらに長期的な圧密を施して液状化強度の増加を確認する必要があると考えられる。

### 7-3-2 豊浦砂の試験について

図 7-4 には、ケース (K) における液状化強度増加率と圧密時間の関係を示す。ここで、液状化強度増加率とは繰返し回数 20 回での繰返し応力比  $R$  を液状化強度比  $R_{120}$  とし、圧密時間 1 日、3 日、1 週間、1 ヶ月での  $R_{120}$  を圧密時間 1 時間での  $(R_{120})_{1hr}$  で除した値である。長期圧密および過圧密履歴を組み合わせた場合の曲線は、図 7-4 に示すように次式の曲線に比較的よく一致していることがわかる。

$$\frac{(R_{120})_{nhr}}{(R_{120})_{1hr}} = T^{0.04} \quad \text{ただし } T: \text{圧密時間}$$

しかし、本研究では過圧密比が 2 の場合でしか実験を行っておらず、正規圧密状態や過圧密比が大きい場合についてさらに検討する必要があると考えられる。

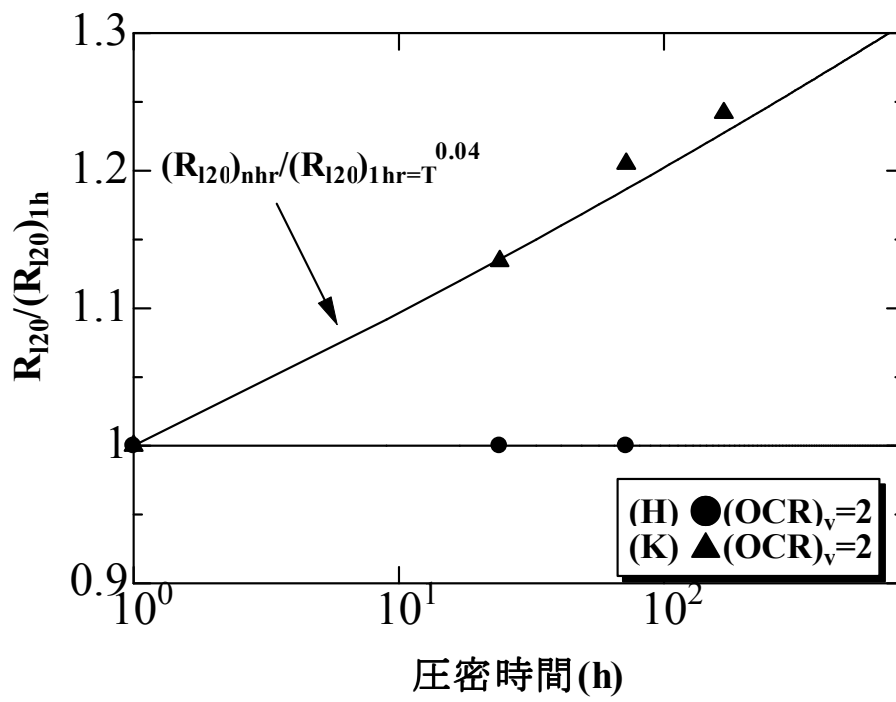


図 7-4 長期圧密による液状化強度増加率の推移

#### 7-4 まとめ

二重セル型中空ねじり試験装置を用い、載荷盛土工法、地下水位低下工法およびそれらを組み合わせた場合を想定した  $K_0$  圧密により長期間圧密し、軸圧制御・背圧制御により過圧密履歴を与えた砂の液状化強度増加率および圧密時に生じる体積変化について調べた。本章の実験で得られた結果は以下のようである。

1.  $K_0$  圧密により長期圧密した後、軸圧制御・背圧制御を組み合わせて過圧密履歴を与えた場合、圧密時間が経過するにつれて液状化強度の増加は小さくなる。
2. 圧密時間を最大拘束圧が作用した時間と定義して長期圧密した場合、1 時間以降の体積変化の増加割合が小さく、液状化強度の増加が期待できない。
3. 圧密時間を初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49 \text{ kPa}$  まで軸圧制御により  $K_0$  圧密し、そのままの状態で放置した時間と定義した場合、圧密時間が経過するにつれて体積変化率の増加割合は小さくなる。
4. 長期圧密と過圧密履歴を組み合わせた場合の曲線は、圧密時間が 24 時間までに急激に上昇し、24 時間を過ぎると緩やかに上昇している。
5. 長期圧密による液状化強度増加率は  $\frac{R_{l20}}{(R_{l20})_{1hr}} = T^{0.04}$  で表される可能性がある。

## 第 8 章 結論

本研究では、 $K_0$  応力条件下において異なる過圧密履歴を組み合わせて受けた砂の液状化強度特性を明らかにすることを目的として、二重セル型中空ねじり試験装置によって載荷盛土工法、地下水位低下工法、およびそれらの工法を組み合わせた場合を想定して、 $K_0$  応力条件下における過圧密砂の液状化強度特性を調べた。また、長期圧密された地盤における過圧密効果を調べる目的で、圧密時間を変化させることで、 $K_0$  圧密によって長期圧密された過圧密砂の液状化強度も調べた。本研究によって得られた結論は以下の通りである。

### 8-1 $K_0$ 圧密による $K_0$ 値の挙動

1. 載荷盛土工法を想定し軸圧制御により過圧密履歴を与えた場合、過圧密比(OCR)<sub>v</sub>が大きくなるにつれて過圧密後の  $K_0$  値は増加し、有効拘束圧も増加する。
2. 地下水位低下工法を想定し背圧制御により過圧密履歴を与えた場合、過圧密比(OCR)が変化しても過圧密後の  $K_0$  値は変化せず、有効拘束圧も変化がない。
3. 載荷盛土工法、地下水位低下工法を組み合わせて適用した場合、適用する順序により  $K_0$  値の挙動は異なり、過圧密後の  $K_0$  値に違いが生じると考えられる。
4. 特に、今回の試験の場合、軸圧除荷点における鉛直有効応力が 98kPa 程度の小さい値であるとき、すなわちケース(E), (G), (I), (J)では、圧密終了点における  $K_0$  値が大きくなり、液状化強度の増加が期待できるものと考えられる。
5. ケース(E)とケース(G)の適用順序で、軸圧制御と背圧制御による応力の比を変化させて、 $K_0$  値の挙動を測定したところ、圧密終了時の  $K_0$  値は、ケース(E)の方がケース(G)に比べて、全体的に大きくなった。また、軸圧制御の応力割合が大きい方が  $K_0$  値は大きくなった。

### 8-2 $K_0$ 圧密により過圧密履歴を受けた砂の液状化試験

1. 繰返し応力比の分母に初期有効拘束圧  $\sigma_v'$  を用いると、軸圧制御では過圧密比の増加に伴う過圧密効果は確認できず、背圧制御ではその過圧密効果が確認できる。
2. 繰返し応力比の分母に初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  を用いると、軸圧制御・背圧制御共に過圧密比の増加に伴う過圧密効果が確認できる。
3. 組み合わせた場合、繰返し応力比の分母に初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'$  を用いると、全ケースにおいて過圧密後における  $K_0$  値の差による効果、過圧密比の増加に伴う過圧密効果が確認できる。

### 8-3 等方圧密および $K_0$ 圧密により長期圧密履歴を受けた砂の液状化試験

1. 等方圧密では過圧密比 1 の状態で長期圧密した場合、液状化強度の増加が期待でき

る。

2.  $K_0$  圧密では過圧密比 1 の状態で長期圧密した場合、常陸那珂埋立砂では液状化強度の増加はほとんど期待できないが、豊浦砂では液状化強度の増加が期待できる結果となった。この原因については、試料の物理的性質に関係があると考えられるが、さらに検討する必要がある。
3. 等方圧密および  $K_0$  圧密において過圧密比 2 の状態で長期圧密した場合、液状化強度の増加は期待できない。
4. 圧密時間を初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49$  kPa まで軸圧制御により  $K_0$  圧密した状態で放置する時間と定義した場合、長期圧密されたことによる液状化強度の増加が期待できる。

#### 8-4 $K_0$ 圧密により過圧密履歴を受けた砂の液状化強度増加率の比較

1.  $(R_{oc})_v=(OCR)_v^n$  のように近似すると載荷盛土工法、地下水位低下工法の  $n$  の値はそれぞれ 0.70、0.50 となった。
2. 液状化強度増加率においては、2 種類の工法を組み合わせた場合の全ケースで、 $n$  の値が 0.50~0.66 であり、軸圧制御および背圧制御を単独で行った場合の中間にある。
3.  $K_0$  応力条件下において、過圧密比  $(OCR)_v$  の値が 1 から 3 の場合では液状化強度増加率を

$$(R_{oc})_v = \frac{(\tau/\sigma_{v0}')_{A,OC}}{(\tau/\sigma_{v0}')_{A,NC}} = \frac{1+2(K_0)_{OC}}{1+2(K_0)_{NC}} \cdot (OCR)_0^n$$

で表すことができる。

#### 8-5 等方圧密および $K_0$ 圧密により長期圧密履歴を受けた砂の液状化強度増加率

1.  $K_0$  圧密により長期圧密した後、軸圧制御・背圧制御を組み合わせると過圧密履歴を与えた場合、圧密時間が経過するにつれて液状化強度の増加は小さくなる。
2. 圧密時間を最大拘束圧が作用した時間と定義して長期圧密した場合、1 時間以降の体積変化の増加割合が小さく、液状化強度の増加が期待できない。
3. 圧密時間を初期鉛直有効応力  $\sigma_{v0}'=49$  kPa まで軸圧制御により  $K_0$  圧密し、そのままの状態に放置した時間と定義した場合、圧密時間が経過するにつれて体積変化率の増加割合は小さくなる。
4. 長期圧密と過圧密履歴を組み合わせると曲線は、圧密時間が 24 時間までに急激に上昇し、24 時間を過ぎると緩やかに上昇している。
5. 長期圧密による液状化強度増加率は  $\frac{R_{t20}}{(R_{t20})_{1hr}} = T^{0.04}$  で表される可能性がある。



## 総括

本章では、以上のように、結論として、各章でまとめられたものを列記した。以下にそれぞれの項目において工学的意義のある点について論述する。

まず、載荷盛土工法と地下水位低下工法による応力履歴の特徴から分かる適用順序に関して述べる。両工法において、過圧密効果の高いのは、過圧密履歴を与えているときに $K_0$ 値が大きくなる効果を考慮すると、載荷盛土工法の方であると言える。しかしながら、両工法を併用することで、さらに高い過圧密比に対しても、適用可能となるため、より安価な工法を実現できると考えられる。ここで、両工法を併用する場合、その適用順序が問題となる。本研究では、この点について $K_0$ 値の測定を通して詳細に検討した。その結果、過圧密時に $K_0$ 値をより大きくするためには、適用順序において、予め背圧減少を行った後、軸圧除荷を背圧増加の前に行うと、 $K_0$ 値が大きくなることに注意する必要がある。また、両工法による応力変化の比については、載荷盛土工法における応力変化をより大きくすることにより、 $K_0$ 値がより大きくなることも重要である。

次に、液状化強度に与える過圧密効果について述べる。以前の研究により、液状化強度比は過圧密比と $K_0$ 値で表わすことができることが明らかになっている。本研究では、このことについても、両工法を適用した試験において再度確認している。したがって、液状化強度は、両工法の適用順序に拘わらず、過圧密比と $K_0$ 値がより大きいほど、大きくなるため、それらを大きくする適用順序を考えれば良いことになる。

最後に、過圧密と長期圧密によるそれぞれの効果について論述したい。従来の研究では過圧密効果と長期圧密効果を別々に取り上げている例が多いが、これらの効果は互いに影響しあうと考えられる。過圧密効果のみについては、液状化強度増加率が過圧密比(OCR)の $n$ 乗で表わされる。これは、埋立地等の新しい地盤に対する液状化対策を検討する際には役立つものである。しかしながら、地盤は堆積年代が経過すると次第に過圧密的な性質を有するようになる。したがって、①そのような過圧密的な性質を有する地盤に対して、過圧密工法が有用であるかどうか、②過圧密履歴を長期間受けた場合に、過圧密効果がさらに増大するかどうか等、工学的な問題が浮上してくるため、これら2つの効果の相互関係を検討することは非常に重要である。本研究では、これらの課題に対し次の結果が得られている。すなわち、①については、短時間だけ圧密された過圧密比(OCR) $v=1$ の場合を過圧密効果、すなわち液状化強度増加の基準にすると、長期圧密後に過圧密履歴を受けたときは、長期圧密の時間が長いほど、過圧密効果が高い結果となった。したがって、原地盤においても堆積している期間が長いほど、過圧密を与えた場合の液状化強度増加が大きくなることが期待される。ただし、今回の実験では最長の圧密時間は1ヶ月であったので、さらに長期の圧密時間を受けた場合についても検討する必要がある。一方、②については、過圧密過程での最大鉛直有効応力による圧密時間を長くして、過圧密効果を検討したが、この場合は、その最大有効応力を除荷する過程で長期圧密効果が消失し、過圧密効果のみが現れる結果となった。したがって、原地盤において過圧密工法を適用する際は、長期に過圧密履歴を与えても、その効果は増大しないことを考慮する必要がある。