

### III-4 砂の再液状化試験

建設省土木研究所 正員 龍岡文夫  
 広島県土木課 正員 ○吉原光美

#### §はじめに

地震によって、一度液状化した飽和砂層の再液状化の可能性を評価するのは、重要なことと思われる。今回、三軸せん断装置を用いて、飽和砂の再液状化試験を静的に行い、液状化後再圧密した供試体は、間隙比が減少した分だけ前より強くなる結果を得たので報告する。

#### §実験方法

供試体寸法は高さ10cm、直径5cmであり、 $e_{max}=1.08$ 、 $e_{min}=0.53$ 、 $U_c=2.21$ 、 $D_{10}=0.22mm$ のやや角ばった粒形の富士川砂を用いた。供試体は、十分に脱気した砂を、脱気水で満たしたモールドの中に、気泡を混入しないようにスプーンで注ぎこむことによって作った。いずれの非排水試験でも、等方圧密した後、 $2.5kg/cm^2$ のバックプレッシャーをかけた。荷重制御でせん断したが、歪速度は、きわめてゆっくりしたものであった。ここで用いた応力、歪の記号は、軸方向応力、側方方向応力を $\sigma_a$ 、 $\sigma_r$ 、軸方向歪、側方方向歪を $\epsilon_a$ 、 $\epsilon_r$ （圧縮正）として

$$\left. \begin{aligned} \text{平均主応力 } p &= \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_r), \text{ 有効応力 } p', \text{ せん断応力 } q = \sigma_a - \sigma_r \\ \text{体積歪 } v &= \epsilon_a + 2\epsilon_r, \text{ せん断歪 } \gamma = \epsilon_a - \epsilon_r \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

#### §有効拘束圧がゼロになる前に再圧密した場合

図-1は、実験で得られた有効応力経路である。まずA点の等方応力状態にある供試体を、非排水せん断することによって、Bの有効応力状態に至った。次に側圧をB点の応力に等しくなるまで下げ、排水コックを開き、側圧を徐々に上げることによって、再圧密した。このとき偏差応力が発生しないように特別の注意を払うことが必要であった。再び非排水状態にして、バックプレッシャーをかけ、再びくりかえしせん断した結果を見ると、ほぼ同じ荷重履歴に対して、2回目の載荷時の方が、1回目よりも、 $p'$ の減少の仕方がかなり小さくなっていることが分る。軸歪 $\epsilon_a$ （点A、Cで $\epsilon_a=0.0$ ）を比べてみても、2回目の載荷時の方がかなり少ない。この強度増加は、間隙比が0.762から0.754に減少したことだけでは説明がつかないように思われる。一度もせん断や過圧密のない正規圧密な供試体（これをvirginな供試体と呼ぶことにする）では、この程度の間隙比の変化では、変形特性の差はほとんどないから、この強度増加は、1回目の載荷による歪硬化が、2回目の載荷に対して、効果をおよぼしているため、と考えた方がよさそうである。

#### §有効拘束圧がほとんどゼロになってから再圧密した場合

2つの供試体について、等方圧密→液状化→再圧密→再液状化→……のサイクルをくりかえした実験を行った。表-1に実験条件が示してある。表中、試験1,2,3はそれぞれ最初の液状化、再液状化、再々液状化試験を意味しており、 $\epsilon_a$ 、 $v$ 、 $\gamma$ は、試験1のせん断開始時にゼロにとってある。供試体Aは、モールド中に砂粒子を水中落下させて作り、供試体Bは、更にモールドを軽くたたくことによって作った。各試験のくりかえしセ

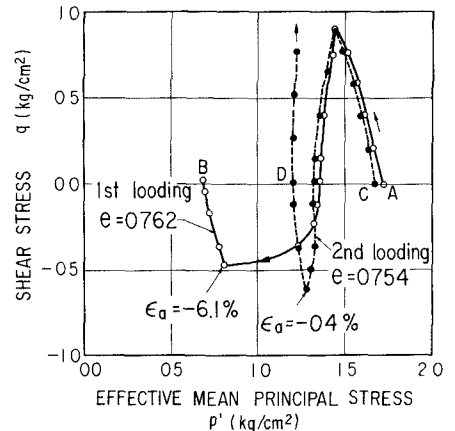


図-1 有効応力経路

ン断応力の載荷のパターンは図3に示してあるように全く任意のものであったが、全ての試験で同じ荷重履歴を順番に与えており、結果の比較ができるようになっている。いずれの試験でも、歪が過大に出ないようにし、又、端面摩擦は除去してあるので、供試体にくびれやびやだる型の変形は生じさせなかったため、供試体内部の歪分布は、ほぼ同様であったものと思われる。特に再圧密の時、側圧をゼロに下げると、次に再圧密する時、 $p'$ がほぼゼロに近いので、少しの偏差応力 $q$ が発生しても $q/p'$ は大きい値となり、供試体をセン断することになるので特に注意した。図2(a), 2(b), 2(c)は、各試験における有効応力経路であり、図中例えばA-2は供試体Aの2回目の液状化試験を意味している。図2(b), 2(c)では煩雑さを避け、試験A-1と同じ荷重履歴のみでしか示していないが、実験には、全ての試験で $p' \rightarrow 0$ となるまで試験を続けた。図-3は、くりかえし回数を横軸にとって $q$ ,  $\epsilon_a$ ,  $p'$ の変化を示しており、図-4は、供試体Bでの間隙比変化と他の virgin な供試体の等方圧密曲線を示してある。これらの図から、次のことが分る。

表-1 実験条件

		試験 1		等方圧密	試験 2		等方圧密	試験 3	
		載荷前	載荷後		載荷前	載荷後		載荷前	載荷後
供試体 A	$e$	0.744	0.744	等方圧密	0.696	0.696	等方圧密	0.662	0.662
	$\epsilon_a$ (%)	0.0	0.87		1.38	-0.63		0.46	1.84
	$v$ (%)	0.0	0.0		2.80	2.80		4.73	4.73
	$r$ (%)	0.0	1.31		0.67	-2.31		-1.68	0.39
	$p'$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	1.740	0.015		1.625	0.015		1.629	0.025
供試体 B	$e$	0.691	0.691	等方圧密	0.659	0.659	等方圧密		
	$\epsilon_a$ (%)	0.0	-2.40		-1.74	-0.61			
	$v$ (%)	0.0	0.0		1.91	1.91			
	$r$ (%)	0.0	-3.59		-3.56	-1.87			
	$p'$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	1.550	0.022		1.504	0.021			

図2(a), 2(b), 2(c)は、各試験における有効応力経路であり、図中例えばA-2は供試体Aの2回目の液状化試験を意味している。図2(b), 2(c)では煩雑さを避け、試験A-1と同じ荷重履歴のみでしか示していないが、実験には、全ての試験で $p' \rightarrow 0$ となるまで試験を続けた。図-3は、くりかえし回数を横軸にとって $q$ ,  $\epsilon_a$ ,  $p'$ の変化を示しており、図-4は、供試体Bでの間隙比変化と他の virgin な供試体の等方圧密曲線を示してある。これらの図から、次のことが分る。

- (1) 供試体A, B共に、液状化→再圧密→再液状化→…のプロセスで、間隙比が小さくなるにつれて、強くなっている。
- (2) 図2(b), 2(c)に示してあるように、同じ間隙比を持っていれば、virginな供試体(B-1)と一度液状化した供試体(A-2), および一度液状化

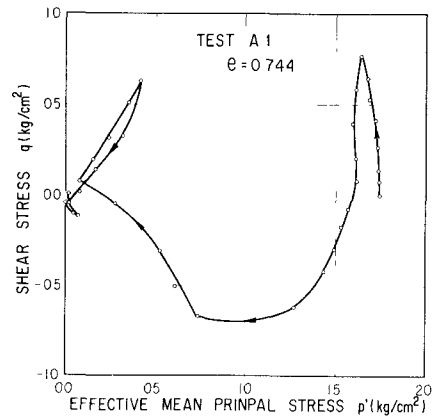


図-2(a) 有効応力経路

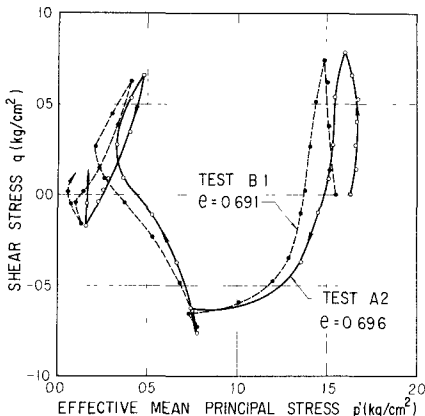


図-2(b) 有効応力経路

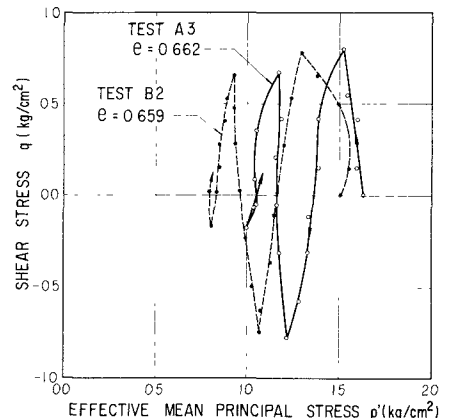


図-2(c) 有効応力経路

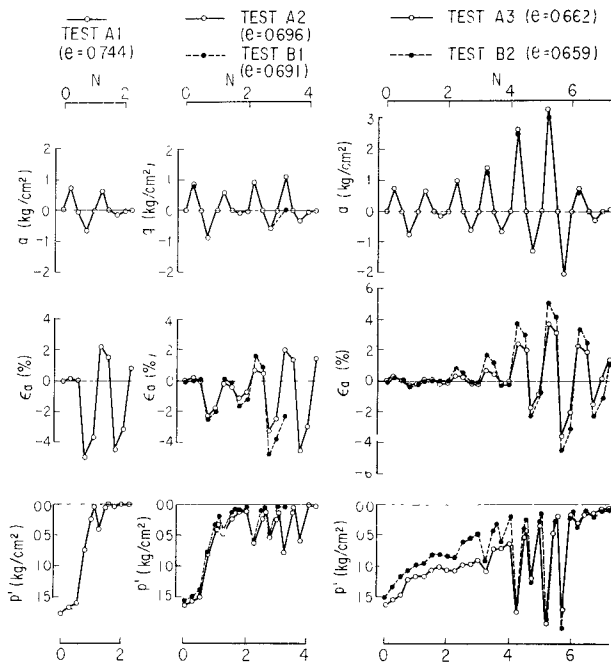


図-3 比較図

した供試体 ( B - 2 ) と、二回液状化した供試体 ( A - 3 ) はそれぞれほぼ同じような間隙水圧上昇、軸歪変化をする。

- (3) 液状化後の再圧密曲線は、 $p'$  が大きくなるにつれて、*virgin* な供試体の圧密曲線に一致してくるようになってくる。 $p'$  がごく小さい時は、必ずしもこうは言えない様である。

### § 考察

上記の様な結果は、他の試験についても得られている。以上のことから、今回の試験の場合、完全に液状化した供試体を再圧密すると、同じ間隙比を持つ、これまでに一度もせん断履歴、過圧密履歴を持っていない *virgin* な供試体と同じ変形特性を持つようになったことが分る。これは、次の2つのプロセスを経たためと解釈できよう。

- (1)  $p' \sim 0$  付近で、歪振幅の大きな両振りくりかえしせん断を受けることによって、等方圧密によって形成されていた等方圧密に対する歪硬化と、図-1に示されているようなせん断歪が小さいせん断変形時に形成されたせん断に対する歪硬化が消滅する。
- (2) 大きなせん断歪によって生じた変形特性の強い異方性は、再圧密時に消滅する。この異方性とは、せん断方向によって、変形特性の異なることを言う。

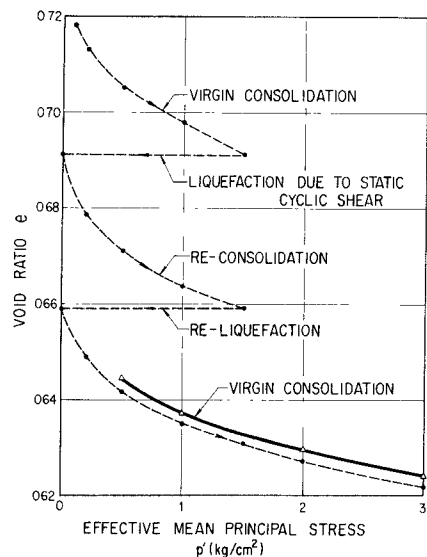


図-4 間隙比変化

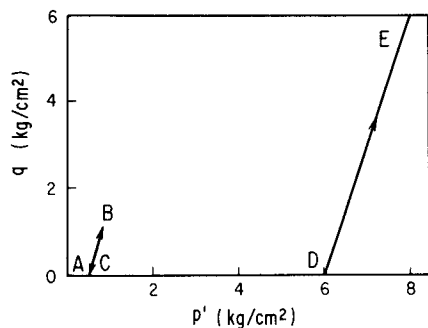


図-5(a) 応力経路

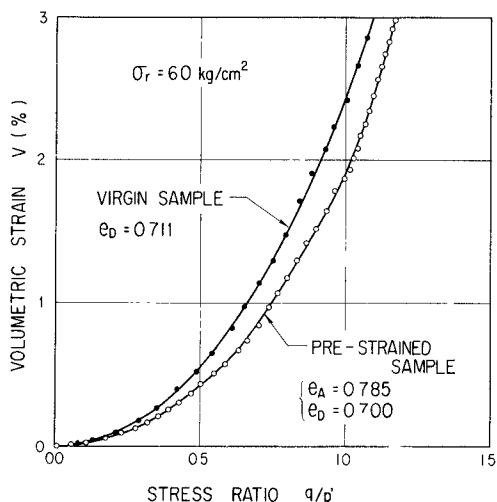
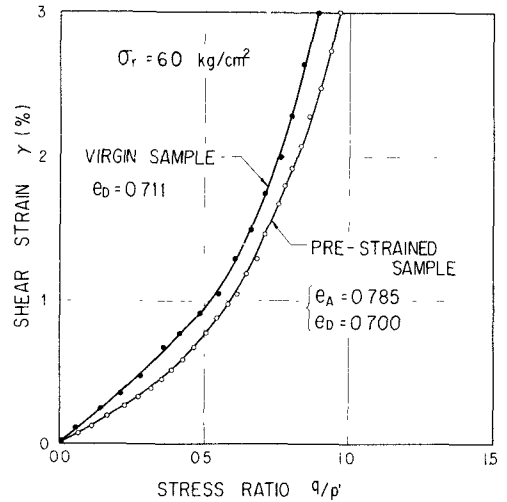


図-5(b) 体積歪応力比変化

(2)に対する傍証として、図5(a)の応力径路の実験を行った。まずA→Bのように側圧 $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 一定で、 $\epsilon_a = 3.5\%$ 、 $r = 4.2\%$ 、 $v = 2.0\%$ まで排水セン断し、次にB→Cのように除荷し、次にC→Dのように等方圧密する。この間の歪変化は $\Delta v = 3.1\%$ 、 $\Delta r = 1.6\%$ であった。次に、D→Eのように排水セン断した時の、Dのとき $v = 0$ 、 $r = 0$ とした時の体積歪変化とセン断歪変化を virgin な供試体のときと比べてのが図5(b)、(c)である。この図から、A→Bのようになかなか大きくセン断しても、引き続いてかなりの体積歪が生ずるまで再圧密すると、供試体の変形特性はほとんど virgin なものに戻ることが分る。液状化後の再圧密でも $v = 2 \sim 3\%$ 程度の体積歪は生じているから、このような現象が生じていると考えても、おかしくはないように思われる。



図一5(c) セン断歪応力比変化

密な virgin の供試体を作るときにモールドをたたく

ことは、供試体に液状化→再圧密→再液状化→…の小さなサイクルを何回も与えていると解釈すれば、上記のようなセン断による液状化→再圧密のプロセスを経た供試体が、同じ間隙比を持つ virgin な供試体と同じ変形特性であってもおかしくはないように思われる。従って、実際の地盤で今回の実験で示したような現象が生じていると仮定すれば、次のように言えよう。「一度、液状化した砂地盤も再液状化する。しかし、間隙比の減少分だけより強くなっている。」これは、更に詳細な実験と現場実験、震害調査等によって調べなければならない。今後の課題である。

又、図-4の再圧密曲線が virgin な供試体の圧密曲線に近似していることから、液状化後の地盤の沈下は virgin な圧密曲線を用いて推定することが可能なものと思われる。

### § まとめ

- (1) 今回の実験では完全に液状化する前に再圧密したら、間隙比の減少分以上に強くなった。
- (2) 完全に液状化してから再圧密した供試体は、同じ間隙比を持つセン断履歴、過圧密リレキのない供試体の変形特性と一致した。つまり液状化、再圧密によって供試体はより強くなった。

### § 補

筆者は、以前に virgin な供試体の歪硬化の過程におけるダイレイタンシー特性を ( $p'$ ,  $q$ ,  $e$ )空間における重層的な曲面群(これを state surface と呼ぶ)で、応力径路のとり方によらないで統一的に表現できることを実験的に示した(龍岡 1971, 龍岡, 芝 1972)。液状化→再圧密のようなプロセスを「かく乱」と呼べば、これを「以前に受けた等方圧密による歪硬化と、セン増による歪硬化が消滅する過程」と定義できる。従って、( $p$ ,  $q$ ,  $e$ )状態がより内側の state surface に移る条件は「かく乱」と言えよう。

### § あとがき

上記の実験は 1972年 6月～8月に東大土質研究室で行った。御指導して下さいました福岡教授、石原助教授に感謝いたします。

### § 参考文献

- 龍岡 文夫(1971), 三軸圧縮における砂の応力-歪特性(第二報), 土木学会年次学術報告会  
 龍岡 文夫, 芝 穎司(1972), 三軸装置における応力-ヒズミ特性(第三報), 土質学会年次学術報告会