

# 砂質土の液状化に関する研究

木村 薫 北村 仁  
平間 邦興

## Study on Liquefaction of Sand

Kaoru Kimura Hitoshi Kitamura  
Kunioki Hirama

### Abstract

In has been reported in many recent papers that sandy ground with a history of vibration is strong against liquefaction compared with ordinary deposited ground. However, more basic studies are necessary to quantitatively grasp the vibration history of earthquake motion and dynamic compaction sustained and to estimate the increase ratio in strength against liquefaction based on the results.

This report arranges the results of series of liquefaction tests by dynamic simple shear apparatus, examining the liquefaction strengths of specimens with histories of strain under various amplitudes.

### 概 要

振動履歴を受けた砂質地盤が通常の堆積地盤に比して、大きな液状化強さを持つであろうことは、最近の研究で数多く報告されている<sup>1)</sup>。しかし、地盤が過去に受けた地震動や振動締めによる振動履歴を定量的に把握し、この結果をもとに液状化強さの増加割合を推定するには、さらに基礎的な研究を必要とするのが現状である。

この報告は、動的単純せん断試験機を使用して実施した一連の液状化試験の内、種々の振幅でひずみ履歴を加えた供試体の液状化強さについて検討を加えたものである。

### 1. 概要

緩い状態で堆積している砂質地盤を対象にして地質調査を進める場合、地震動による液状化現象の発生はかかせない項目となる傾向にあり、液状化発生にかかわる判別方法や解析方法が数多く提案されている。しかし、判別や解析を行なう上で重要な要素となる現位置の液状化強さの推定については、手法的にもデータ集積の面でも、未だ不十分な面の多いのが現状といえよう。

ここで、筆者らがこれまでに全国各地の自然堆積砂層や埋立砂層から採取したものの内から、代表的な11試料の粒径加積曲線を一括して示したのが図-1であり、対応する物理性状は表-1に示すとおりである。この内、特に試料Aは、「1978年宮城県沖地震」によって液状化に伴う噴砂・噴水現象を生じた現場から採取してきたものである。これらすべての試料について、液状化強さを繰り返し回数( $N_i$ )の範囲ごとに、応力比( $\tau_i/\sigma_{0v}$ )と相対密

度( $D_r$ )の関係で示したのが図-2である。これらの液状化試験はいずれも動的単純せん断試験機により実施したもので、供試体作成条件、拘束圧・動的載荷条件は、ほぼ一様である。同図において、 $(\tau_i/\sigma_{0v}) \sim D_r$ の関係は、同一繰り返し回数の範囲ごとにまとまって、一応の傾向が認められることから、振動履歴を受けない飽和砂が液

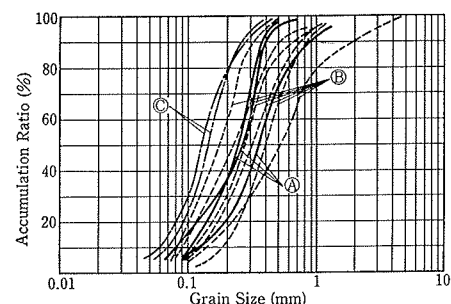


図-1 粒径加積曲線

液化を生じるのに必要な繰返し载荷回数( $N_L$ )は、従来の報告<sup>2)</sup>で示される様に、 $N_L = f_n(\tau_l, \sigma_{0v}, D_r)$  で与えられ、応力比( $\tau_l/\sigma_{0v}$ )は相対密度との関数として示されることがわかる。これらの結果を相対密度50%の場合に統一して、定量的な液化化強さの範囲で示したのが図-3である。 $(\tau_l/\sigma_{0v}) \sim N_L$ の平均的カーブは、これまでに報告されてきた傾向と良く一致するようである。

一方、沖積・洪積砂層 ( $D_r=40\sim70\%$ ) について、液化化応力比  $(\tau_l/\sigma_{0v})_R$  を単純に相対密度から推定し、地

	採取場所	Gs	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	Uc
A-1	宮城県 閉上大橋 (川砂) 閉上港 名取天橋	2.69	0.997	0.619	2.7
		2.67	1.008	0.635	3.6
		2.70	0.932	0.621	3.6
B-1	長崎県  (海底堆積砂)	2.75	1.227	0.788	2.6
		2.68	1.387	0.790	3.4
		2.75	1.474	0.908	2.2
		2.71	1.347	0.830	2.6
		2.74	1.474	0.928	2.9
		2.81	1.573	0.968	2.3
C-1	東京都 葛西沖 (埋立地)	2.72	1.274	0.547	2.0
		2.74	1.222	0.592	2.5

表-1 試料の物理性状

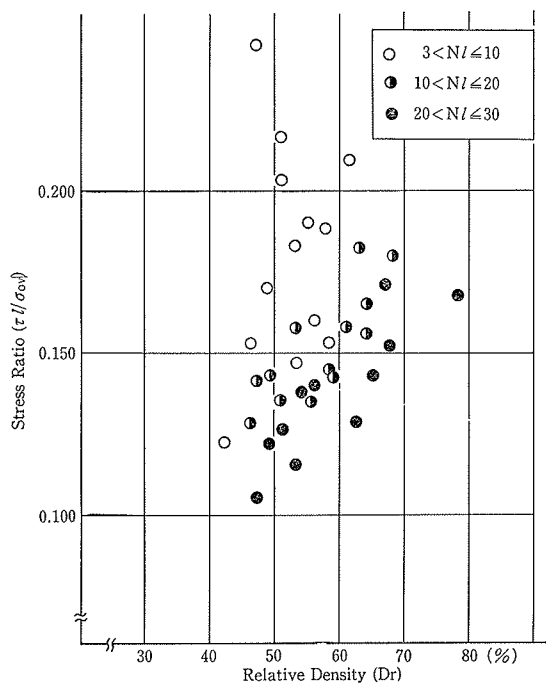


図-2 応力比～相対密度

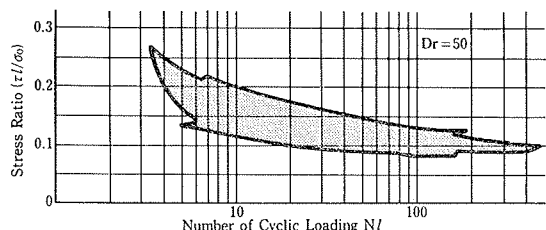


図-3 応力比～繰返し回数

表面加速度0.2~0.3(G)程度の地震動による地中せん断応力( $\tau_d$ )と比較すれば、沖積・洪積砂層のほとんどで液化化現象が生じ、締め固処理地盤においても液化化発生の可能性が大きいと判断されることが多い。したがって、N値や相対密度のみによって現位置の液化化強さを推定すると、実際よりも過少に評価される場合が生じること、及び、密度以外にも、液化化強さに深くかかわる因子が存在することが予想される。

この報告は、振動締め固めや地震動などの振動履歴を液化化強さに関係する重要な因子の一つと考え、これを受けた地盤の液化化強さを検討する目的で実施した要素試験の結果について検討したものである。

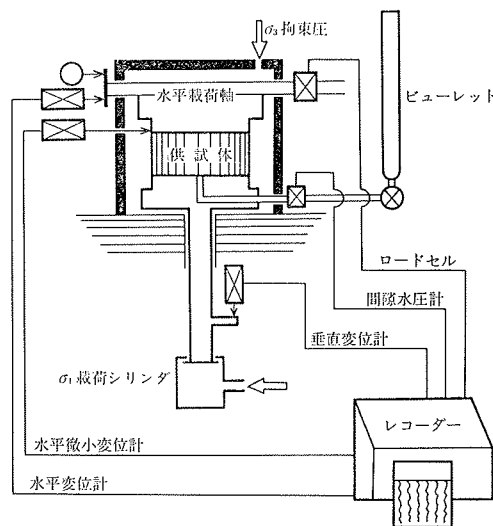


図-4 動的単純せん断試験機概要図

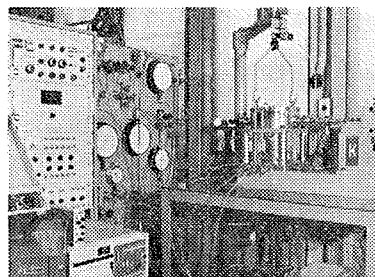


写真-1 動的単純せん断試験機



写真-2 噴砂現象地点

## 2. 実験装置・試料・供試体について

液状化要素試験に使用した動的単純せん断試験機の概要を図-4および写真-1に示す。本機の基本的な機構は、既報<sup>3)</sup>と変わっていないが、変位制御系の精度を向上させる目的で供試体キャップ部へ微小変位計を取り付けてある。

試料は、図-1、表-2に示した試料の内、宮城県産の3種類の川砂(試料A)を用いた。これらの試料は宮城県沖地震の際に、写真-2に示すような噴砂現象を生じた地点から採取したものである。

供試体の作製に当っては、事前に十分真空脱気した飽和試料を、脱気水と共に径70mmのワイヤーメンブレン内にスプーンで流し込み、高さ25~30mmとした。供試体キャップ・セル等をセット後、飽和度を高める為2.0 kg/cm<sup>2</sup>のバックプレッシャーを加えた。初期有効拘束圧(等方圧密圧)は、1 kg/cm<sup>2</sup>であり、これを載荷した際の間隙圧係数(B値)は、各供試体とも0.95以上となったことを確認している。

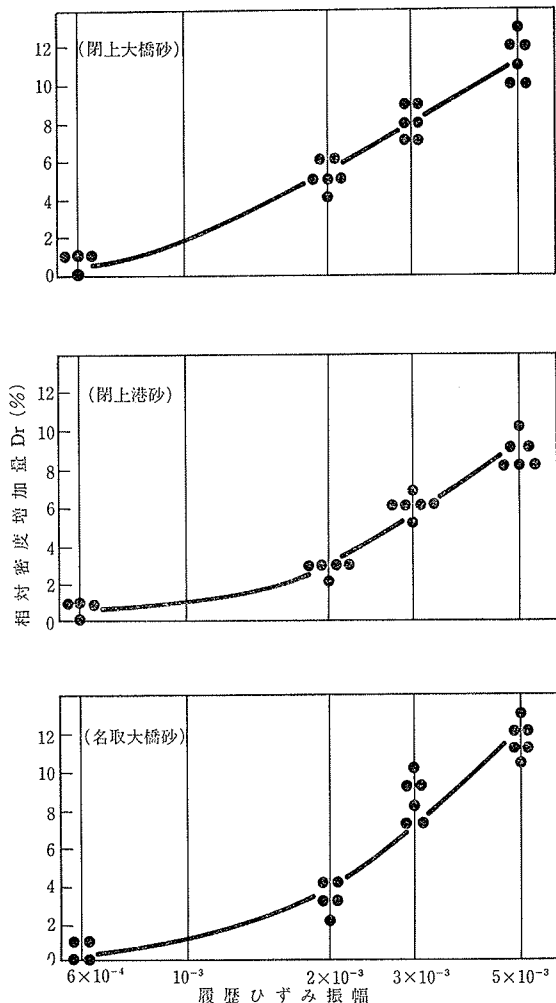


図-5 相対密度増加量～履歴ひずみ振幅

試験供試体としては、このような自然堆積状態で圧密排水させた供試体に加えて、さらに、それぞれ $6 \times 10^{-4}$ 、 $2 \times 10^{-3}$ 、 $3 \times 10^{-3}$ 、 $5 \times 10^{-3}$ の4種類のひずみ振幅で履歴を加えた、計5種類の供試体を液状化試験に供した。ひずみ履歴は、正弦波形で、周期は1 Hzとし、排水・側方変位拘束条件下で排水量が増加しなくなるまでくわえた。各供試体は、おおむね50回のひずみ履歴を受けると、密度変化がなくなるようである。ひずみ履歴ごとに、相対密度増加量を一括して示したのが図-5である。

## 3. 試験結果と考察

液状化試験は、履歴を加えた後非排水状態とし、一定繰り返し応力を加えて実施した。実測例を図-6にしめす。測定は、せん断応力( $\tau$ )、ひずみ( $\gamma$ )、間隙水圧( $du$ )について行ない、間隙水圧が拘束圧に等しくなった点( $du/\sigma_{ov}=1.0$ )を完全液状化状態とした。

繰り返し回数に対応する間隙水圧の上昇傾向は、履歴を受けた供試体では緩やかであるのに対して、履歴を受けなかった供試体では1~3回で急激な上昇が認められる。その後は載荷回数に対して一様な上昇傾向をとり、 $du/\sigma_{ov}=0.7$ を超えるあたりからひずみが急増しはじめ、完全液状化状態では、いずれの供試体についても、ひずみ振幅は、設定したせん断応力の大きさに比例して大きい値を示すようになる。

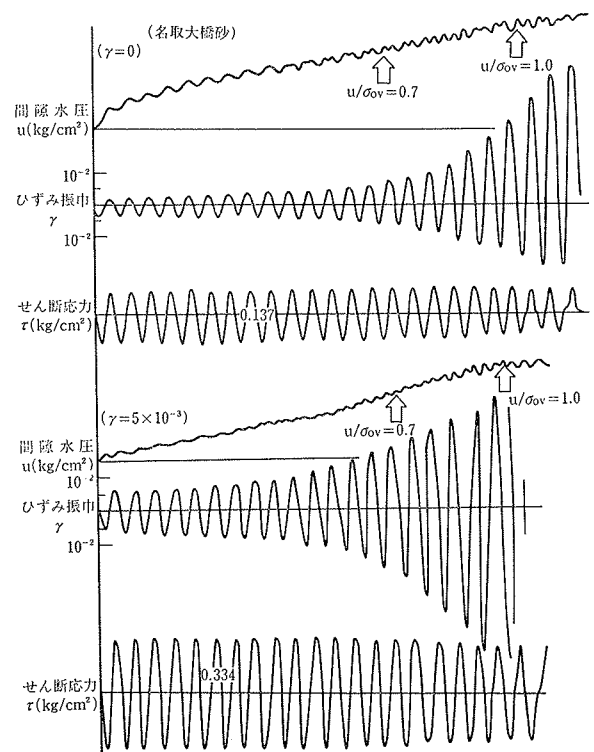


図-6 液状化要素試験実測例

実測データから得られた液状化に至る繰り返し回数 ( $N_L$ ) と応力比 ( $\tau_i/\sigma_{ov}$ ) との関係、履歴ひずみ振幅ごとに示したのが図-7である。ここで各液状化強さを示す曲線群は、ほぼ履歴ひずみ振幅の大きさに対応して異なり、履歴ひずみ振幅が大きいほど大きい液状化強さを示す傾向が明確である。図-8は、履歴を受けなかった供試体の  $D_r=50\%$  における  $(\tau_i/\sigma_{ov})_N \sim (N_L)$  の曲線 ( $\gamma=0$ ) を基準に、履歴を受けた供試体についての応力比を

密度差に応じて補正したものである。すべての曲線は、液状化試験の際の相対密度を50%とした場合の推定値を示す。図-7と比較して、ひずみ振幅ごとにしめされる  $(\tau_i/\sigma_{ov}) \sim (N_L)$  の傾向は変わらず、 $D_r$  のばらつきと無関係に成立するようである。したがって相対密度の差を起因とする応力比の増加に比して、ひずみ履歴の影響は大きく、供試体内部において、その液状化強さにかかわる微視的構造の変化(インターロッキング、粒子配列)が

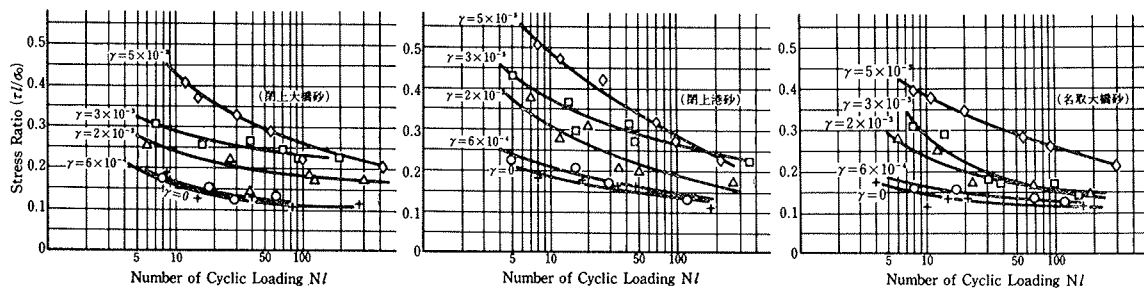


図-7 応力比～相対密度

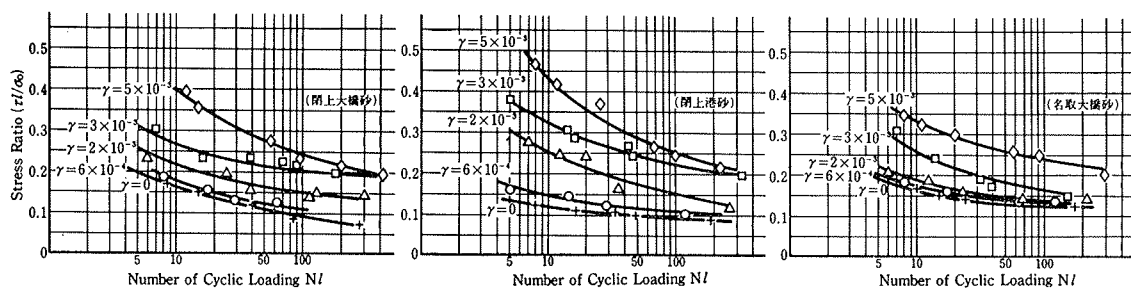


図-8 応力比～相対密度 (相対密度補正後)

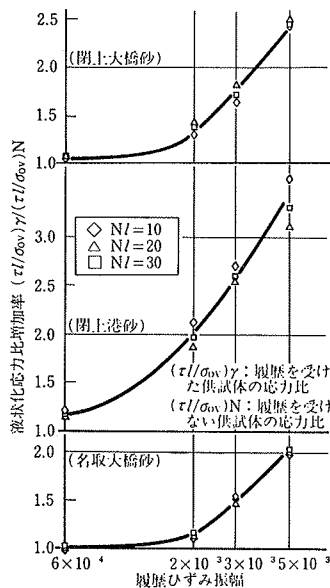


図-9 応力比増加率～履歴ひずみ振幅

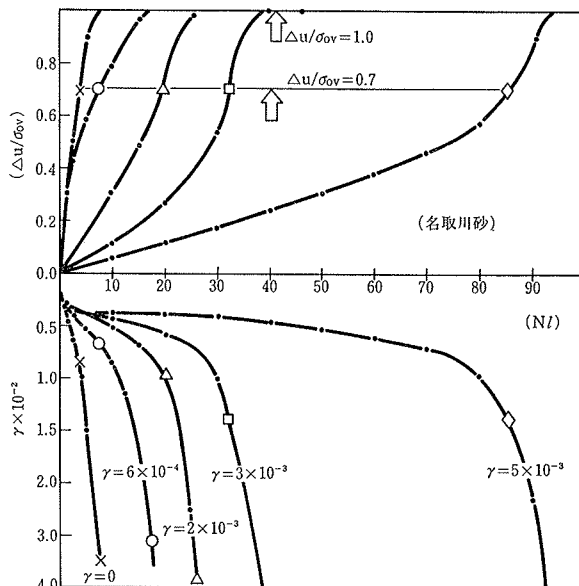


図-10 発生間隙水圧・ひずみ量～繰り返し回数

生じたと理解できよう。しかも、この傾向は、3 試料に共通して明確に認められる。ここで、これらの3 試料については、前掲のごとく、物理性状（特に粒度特性）が類似しているにもかかわらず、履歴による応力比の増加量には、かなりの差が認められる。

この傾向を、液状化応力比増加率  $(\tau_i/\sigma_{ov})\gamma/(\tau_i/\sigma_{ov})_N$  と履歴ひずみ振幅の関係で示したのが図-9である。増加率の傾向で示せば、閉上港砂が最も大きく、閉上大橋砂、名取大橋砂の順に小さくなる。また、同一試料における液状化発生繰り返し回数 ( $N_i=10, 20, 30$ ) ごとに得

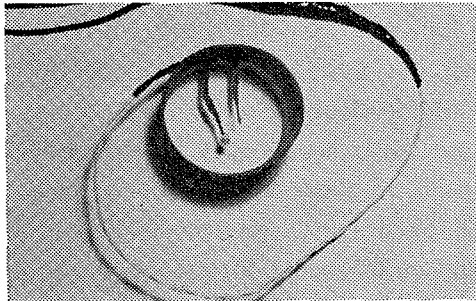


写真-3 圧力センサ内蔵メンブレン

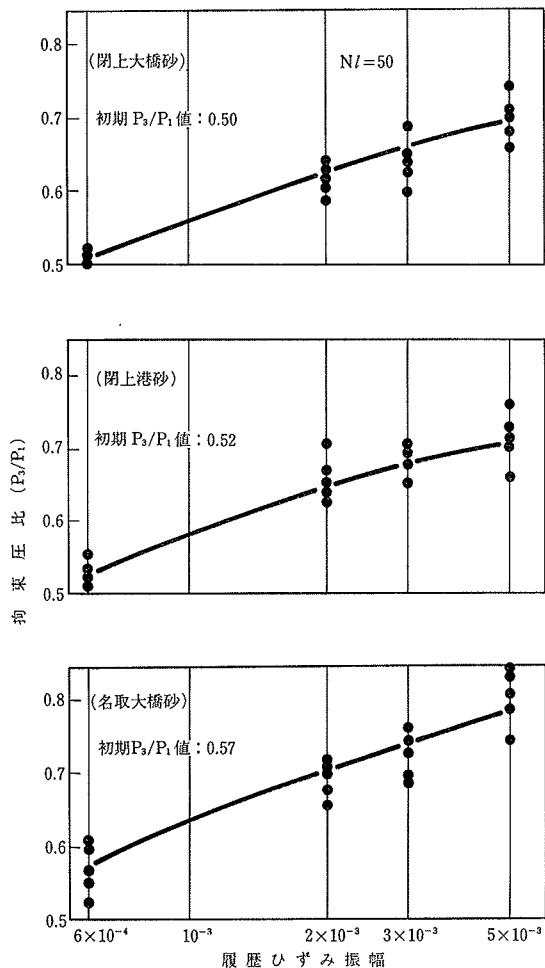


図-11 水平・鉛直圧力比～履歴ひずみ振幅

られる増加率には有意の差は認められない。一方曲線傾向については、履歴ひずみ振幅が  $1 \times 10^{-3}$  あたりから増加がはじまり、 $2 \times 10^{-3}$  を越えるとひずみ振幅に対して直線的な増加傾向となる。このひずみ領域では砂質土の動的変形特性は、弾塑性的であるが、ダイレタンシー特性が現れはじめる部分でもあると考えられている<sup>4)</sup>。したがって、各試料ごとに現れる増加率の差は、粒子形状その他の微視的因子が影響していると考えられることができる。

閉上大橋砂を例にとりて、履歴ひずみ振幅別に、液状化試験過程における発生間隙水圧とひずみの進行状態を示したのが図-10である。いずれも、ほぼ同様な応力比で液状化試験を実施した結果である。したがって履歴の影響は、主に液状化試験における繰り返し回数  $N_i$  によって解釈され、特に  $\Delta u/\sigma_{ov}=0.7$  までの間隙水圧上昇過程、ならびにひずみの進行過程には、明らかに履歴による特異性が見られる。すなわち、大きいひずみ履歴を受けた供試体ほど、粒子の構造変化によって液状化強さが増加し、また、間隙水圧に変換されるべき体積変化が生じにくくなっているため、一定間隙水圧を蓄積するまでの繰り返し回数が多くなる。しかしながら、発生間隙水圧が  $\Delta u/\sigma_{ov}=0.7$  を越えて有効応力が減少し、液状化破壊に近づくとき、土粒子の構造的な差異などにかかわりなく、一様にひずみが急増する様子が明らかである。

これまで検討してきたように、液状化強さの要因の内、ひずみ履歴による供試体内部の粒子構造の変化が占める割合は、きわめて大きいと考えられる。しかし、これに加えて、ひずみ履歴を受けた際に変化する応力状態 ( $K_0$  の増加) についても、液状化強さの増加要因として検討する必要がある<sup>5)</sup>。

ここでは参考のため、補足実験として、ひずみ履歴を受けた後の供試体内における応力状態について検討した。使用した試料は、これまでと同じ3 試料であるが、ただし乾燥砂供試体である。まず、写真-3に示すような圧力センサを内蔵したワイヤーメンブレンを使用して、鉛直方向圧のみを加え、しかる後にひずみ履歴をあたえた。この際、ワイヤーメンブレンの作用により、側方変位拘束条件となる。履歴中は、鉛直方向圧 ( $p_1$ ) は、空気圧で一定に保たれるため、圧力の変化は、水平方向圧 ( $p_3$ ) のみの増加が認められた。各試料における ( $p_3$ ) の増加は、10回程程度の初期の繰り返し回数でも著しく認められたが、履歴ひずみ振幅が大きい供試体ほど、大きな繰り返し回数まで増加が続く傾向にあった。50回の繰り返し回数において測定された、水平方向と垂直方向圧の比 ( $p_3/p_1$ ) を、ひずみ振幅に応じて示したのが図-11である。圧力センサーの受圧面積が小さいことや、その設置精度につ

いても満足のいくものではないが、一応の傾向は認められよう。

ひずみ振幅に応じて( $p_3/p_1$ )の増大する傾向は、前様の液状化強さの増加傾向に対応するものである。以上の傾向からも、履歴による応力状態の変化が、せん断に対して抵抗を高めること、および液状化発生までに蓄積されるべき間隙水圧の量( $4u$ )の増加することなどが類推されよう。

#### 4. あとがき

今般実施した一連の実験では、履歴中における相対密度の変化を把握する目的から、発生した間隙水圧を即時逸散させて実施した。したがって、有効応力の減少については考察できなかった。

また、今般使用した試験機による実験では、ひずみ履歴の方向と、液状化試験におけるせん断応力の方向が同一であったため、液状化強さの上昇傾向が、あらゆる方向からのせん断応力に対応するものとは限らない。したがって粒子配列の異方性を含めた詳細な検討が今後の課題となる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、月岡、石原、他：応力履歴の砂の液状化強度におよぼす影響、土木学会第32回講演概要集第3部、(昭和52.10)、pp. 243~244、同じく、砂の液状化強度と応力履歴の関係、土木学会第33回講演概要集第3部、(昭和53.9)、pp. 199~200、等一連の報告  
草野、小川：細粒分を含む…(くり返しせん断応力履歴が液状化強さに及ぼす影響)、第13回土質工学研究発表会講演集、(昭和53.6)、pp. 541~544
- 2) 谷本：飽和砂質土の室内実験による液状化、第16回土質工学シンポジウム発表論文集、(1971)、pp.21~26
- 3) 斎藤、他：ネジリ振動による砂質地盤の締固め試験、大林組技術研究所報、No. 17、(1978)
- 4) Silver, M. L. and Seed, H. B.: Deformation Characteristics of Sands under Cyclic Loading, Proc. ASCE, SM 8, (1971), pp. 1081~1098
- 5) Ishihara, K. and Li. S.: Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test, Soils and Foundations, Vol. 12, No. 4, (1972), pp. 65~77