

砂地盤の再液状化特性に関する実験的研究

平 間 邦 興 松 本 伸

Experimental Study on Reliquefaction Characteristics of Saturated Sand

Kunioki Hirama Shin Matsumoto

Abstract

Whether ground liquefied in an earthquake will be liquefied again in the next earthquake is an important problem from the standpoint of earthquake-resistant design. However, few studies have been made regarding this problem and there is no accepted opinion yet as to whether reliquefaction occurs more easily or is more difficult to occur. Shaking table tests were therefore conducted to investigate reliquefaction characteristics. The results obtained were as follows:

(1) The liquefaction resistance of a sand layer liquefied once is lower than that of the virgin sand layer.

(2) If the sand layer is subjected to small strain histories following the first liquefaction, the reliquefaction resistance is prominently increased.

(3) When pore water pressure in the sand layer has not yet been dissipated, the effect of the small strain histories will not be so marked.

概 要

地震などによって一度液状化を生じた地盤が、次の地震で再び液状化するか否かという再液状化に関する問題は、耐震設計上非常に重要である。ところが、これに関する研究は比較的数も少なく、また、その結論についても再液状化しやすくなるのかあるいは逆にし難くなるのか、未だ定説の得られない状況にあるといえよう。そこで、この再液状化特性を明らかにするために振動台実験を行ない、次のような結論を得た。

(1) 一度液状化を生じさせた砂層の液状化抵抗（再液状化抵抗）は、処女砂層の液状化抵抗よりも低くなる。

(2) 一度目の液状化に続けてひずみ履歴を与えた場合、再液状化抵抗は著しく増加する。

(3) 過剰間隙水圧が消散しきれていない時には、ひずみ履歴を与えても余り効果はない。

1. はじめに

地震などによって一度液状化を生じた地盤が、次の地震で再び液状化するか否かという再液状化の問題は、耐震設計上非常に重要である。ところが、これに関する研究として、現地での震害事例調査によるもの¹⁾あるいは、実験的に行なったもの^{2),3)}などがあるが数も少なく、また、それらの結論づけを見ると、再液化しやすくなる、あるいは逆にしにくくなるというものがあり、いまだ定説の得られない状況にあるといえよう。

一方、再液状化のような過去に液状化に至るほどの大きなひずみ履歴を受けた場合とは別に、液状化に至らない程度の小さなひずみ履歴を受けた砂地盤の液状化特性に関する研究は、これまで数多くなされてお^り2),4), いず

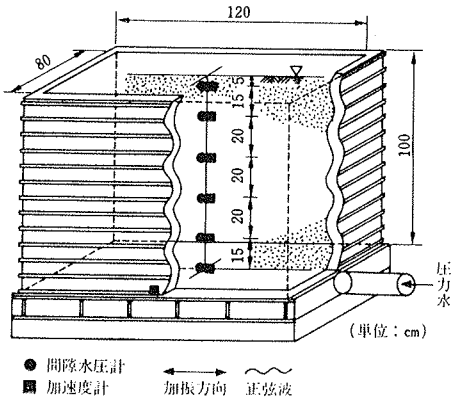
れも、同じ密度の場合、液状化抵抗が非常に大きくなるということが指摘されている。

この報告は、過去に液状化のような大ひずみ履歴を受けた地盤の液状化特性、つまり再液状化特性を明らかにするとともに、一度目の液状化後に続けて小ひずみ履歴を与え、これが再液状化特性にどのような影響をおよぼすかを振動台実験により検討したものである。

2. 実験方法

用いた試料は、鬼怒川砂 ($e_{\max}=1.098$, $e_{\min}=0.658$, $G_s=2.69$, $U_c=2.71$, $D_{50}=0.44$ mm) である。

図—1 に示す小型せん断土槽に層厚 95 cm 程度の緩い飽和砂層を土槽下部からの圧力水によるボーリング方法を用いて均一に作成する。この処女砂層の相対密度は



図一 せん断土槽およびセンサー配置

概ね50%であった。加速度計（容量：1 G、ひずみゲージタイプ）および間隙水圧計（容量：0.5 kgf/cm²、ひずみゲージタイプ）は、図中に示す位置に設置した。

また、この砂層を液状化させない程度の小さな加速度（20 gal）で共振実験を行なった結果、一次の共振振動数は8.5 Hzであった。このことを考慮して振動台の加振振動数を3 Hzとした。

図一2は、一度目の液状化（以下、初液状化と呼ぶ）およびその後の小ひずみ履歴を付加するために使用した振動加速度の波形である。250 gal×5波の载荷によって一度砂層を完全に液状化させ、その後、比較的小さな加速度振幅によって小ひずみ履歴を与える。なお、履歴の種類およびその時砂層に生じる平均的なせん断ひずみ量を表一1に示すが、概ね、10⁻³~10⁻⁴のオーダーであった。また、同表には沈下量を考慮して求めた再液状化実験前の砂層の相対密度を示す。初液状化によって3%程度、更にその後のひずみ履歴によって大きい場合には数%の増加が認められた。実験のフローは図一3に示すように、通常の液状化実験、再液状化実験および小ひずみ履歴を付加した場合の再液状化実験の3系統からなる。

3. 解析方法

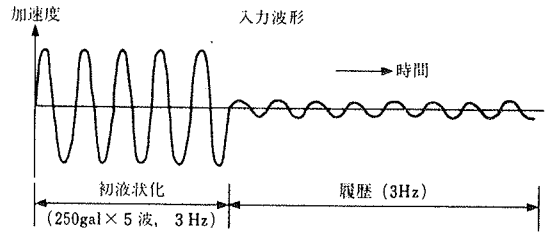
前述のように加振振動数は、共振振動数に比較して十分低いので、砂層は一次のせん断型で動くといえよう。したがって、砂層に生じるせん断力 τ_d は次式で示される⁵⁾。

$$\tau_d = (\alpha/g) \cdot \rho_v \cdot h \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 α : 台加速度 g : 重力加速度
 ρ_v : 湿潤密度 (=1.9 t/m³) h : 深さ

また、砂層に生じるせん断ひずみは、各層の加速度波形を積分して変位波形とし、これらの差と層間距離より次式のように求めることができる。

$$\gamma_{i,i+1} = \frac{\int \alpha_i dt - \int \alpha_{i+1} dt}{l_{i,i+1}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

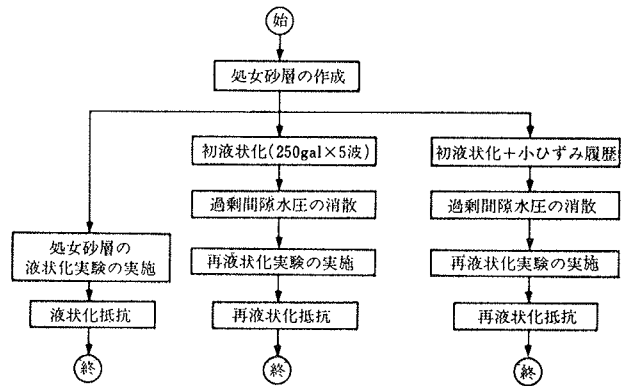


図一2 初液状化および小ひずみ履歴波形

履歴数 履歴 加速度	0	15	45	90	300	地盤ひずみ量
0gal	○ (53.0)	--	--	--	--	--
30gal	--	--	--	○ (54.1)	--	4 × 10 ⁻⁴
50gal	--	○ (53.8)	○ (54.6)	○ (55.0)	○ (55.2)	5 × 10 ⁻⁴
70gal	--	--	--	○ (56.0)	--	1 × 10 ⁻³

() 内は履歴後の相対密度(%)

表一1 初液状化後の小ひずみ履歴



図一3 実験のフロー図

ここで、 $\gamma_{i,i+1}$: $i \sim i+1$ 層間に生じるせん断ひずみ
 α_i, α_{i+1} : i および $i+1$ 層の加速度
 $l_{i,i+1}$: $i \sim i+1$ 層間の距離

なお、過剰間隙水圧が有効上載圧と等しくなった点 ($U/\sigma'_v = 1.0$) を液状化と定義する。

4. 処女砂層の液状化実験結果

再液状化実験に先立って、まず処女砂層の液状化実験を行なった。図一4は、台加速度 125 gal で液状化実験を行なって得られた各層の過剰間隙水圧および台加速度の経時変化を示したものである。上から2層目までは完全に液状化しており、それ以深の層においてもかなりの過剰間隙水圧が発生している。また、下層では比較的早い時期に過剰間隙水圧の消散が生じているが、上層になるほど下層からの浸透の影響を受けて消散時間が長くなる様子がうかがえる。

図一5は、台加速度を数種類変えた加振実験によって

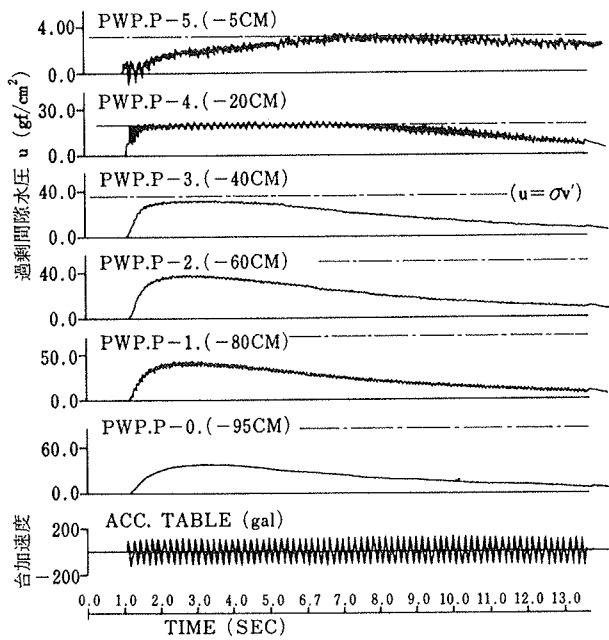


図-4 処女砂層の液状化実験結果 (125gal)

得られた過剰間隙水圧の最大値 (U_{max}/σ'_v) の深度分布の例を示したものである。この図から、液状化は上層から下層に発達していることがわかる。また、80 gal を越えると上層の多くで液状化が発生するが、それ以下の加速度では最大でも $U_{max}/\sigma'_v = 0.80$ 程度を示し、液状化には至っていない。これらの結果をもとに初液状化後の履歴加速度を 80 gal 以下に決めた。

図-6 は、上から 2 および 3 層目で得られた液状化に至る繰り返し回数 (N_1) と応力比 (τ_d/σ'_v) との関係を示したものである。どれも、5 回以下の繰り返し回数で液状化しており、要素試験機による一般的な液状化試験(非排水状態)で得られる傾向とは、かなり趣きを異にするようである。

5. 再液状化実験結果

5.1. 小ひずみ履歴を与えない場合の液状化抵抗

図-7 は、250 gal \times 5 波の載荷によって砂層を完全に液状化させたときの過剰間隙水圧を示したものである。再液状化実験は、この過剰間隙水圧が完全に消散するのを待って実施した。図-8 は、台加速度 130 gal の場合の再液状化実験結果を示したものである。上から 3 層目までは完全に液状化している。ところが、前述の図-4 で示したように処女砂層の液状化実験においては、台加速度が多少異なるものの上から 2 層目までが完全に液状化しているものの 3 層目については、 $U_{max}/\sigma'_v = 0.9$ となっており、完全な液状化には至っていない。したがって、処女砂層の液状化実験よりも再液状化実験の方が間隙水圧が上昇しやすい、つまり、再液状化抵抗は低くな

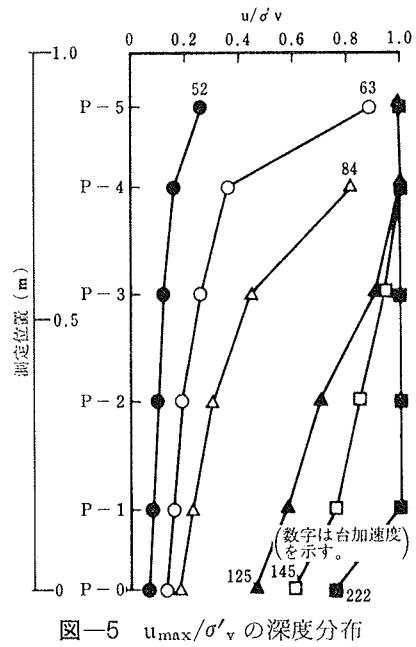


図-5 U_{max}/σ'_v の深度分布

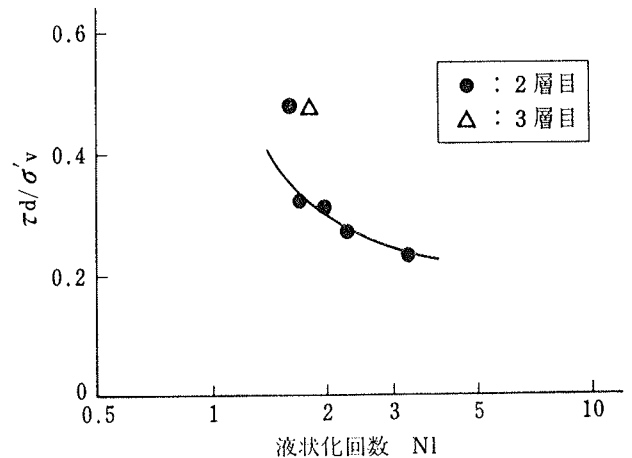


図-6 処女砂層の $\tau_d/\sigma'_v \sim N_1$ 関係

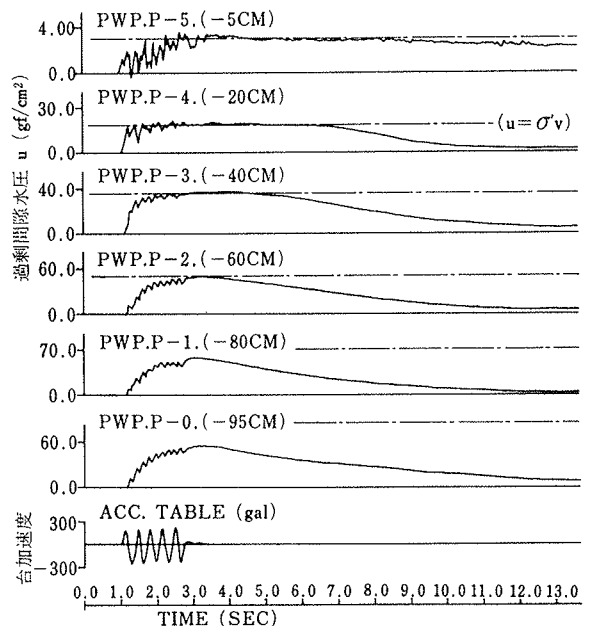


図-7 初液状化時の過剰間隙水圧

っていると考えるのが自然である。

図-9は、2および3層目で得られた τ_d/σ'_v と N_1 との関係を示したものである。

5.2. 小ひずみ履歴を与えた場合の再液状化抵抗

初液状化後に続けて小ひずみ履歴を付加し、過剰間隙水圧が完全に消散するのを待って再液状化実験を行なった。図-10は、50 gal×90波の履歴を付加した場合の再液状化実験結果（台加速度：130 gal）である。上から2層目までは液状化しているもののそれ以深では完全な液状化には至っておらず、図-8の履歴を与えない場合に比べて過剰間隙水圧が全体的に低くなっていることがわかる。

以下、上から2層目を例にとりて検討を進める。図-11は、履歴波数を90波一定として履歴加速度が異なる場合の τ_d/σ'_v と N_1 との関係を示したものである。履歴加

速度が大きくなるほど再液状化抵抗も大きくなることがわかる。

また、図-12は、履歴加速度50 gal一定で履歴波数が異なる場合の τ_d/σ'_v と N_1 との関係を示したものである。履歴波数が多くなるほど再液状化抵抗が大きくなる傾向が認められる。ただし、45波までの履歴では、かなりの効果があるものの、更に履歴波数を増やしても再液状化抵抗はほとんど変わらないことがわかる。これは、履歴による砂粒子の再配列がある程度の波数で安定化してしまうためであろう。

5.3. 通常の液状化抵抗と再液状化抵抗の比較

一般に要素試験によって得られる液状化抵抗としては、20回で液状化する応力比 $(\tau_d/\sigma'_v)_{20}$ あるいは、10回で液状化する応力比 $(\tau_d/\sigma'_v)_{10}$ などが用いられる。ところが、前述したように、今回の振動台実験においては排水状態

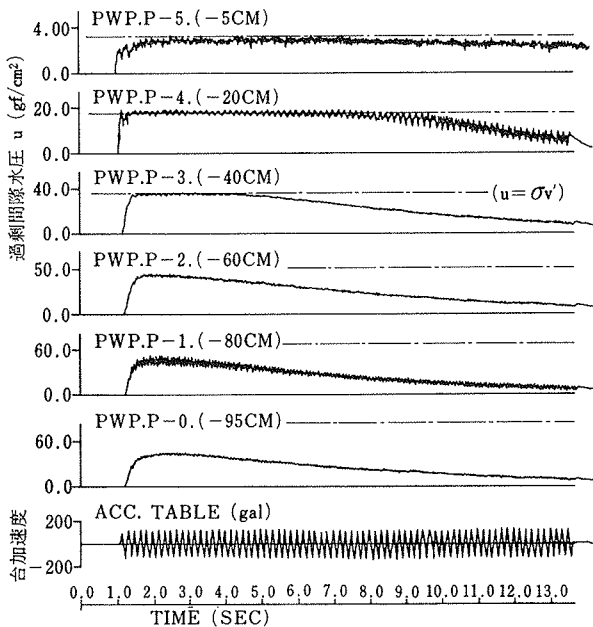


図-8 再液状化実験結果（履歴なし）

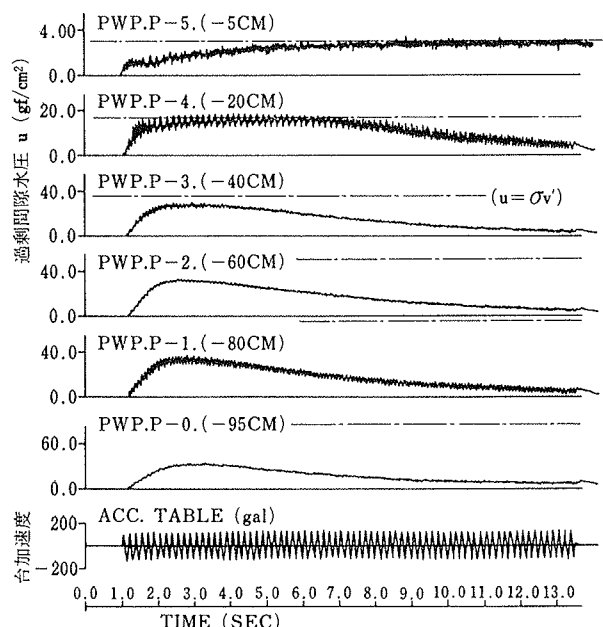


図-10 再液状化実験結果（履歴：50 gal×90波）

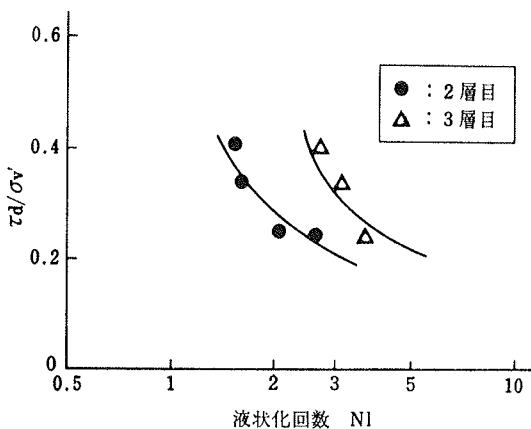


図-9 再液状化実験による $\tau_d/\sigma'_v \sim N_1$ 関係（履歴なし）

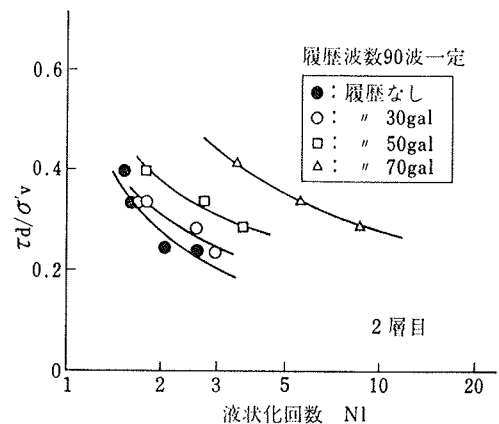


図-11 再液状化実験による $\tau_d/\sigma'_v \sim N_1$ 関係（履歴波数：90波一定）

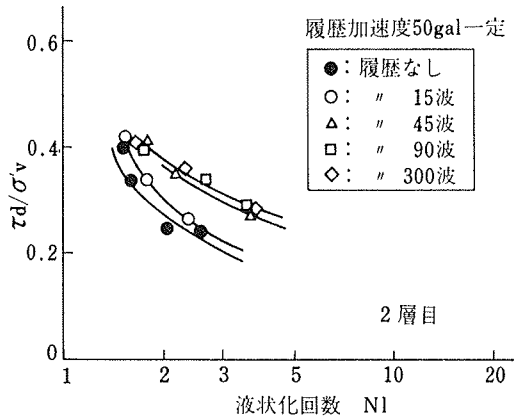


図-12 再液状化実験による $\tau_d/\sigma'_v \sim N_1$ 関係 (履歴加速度: 50 gal 一定)

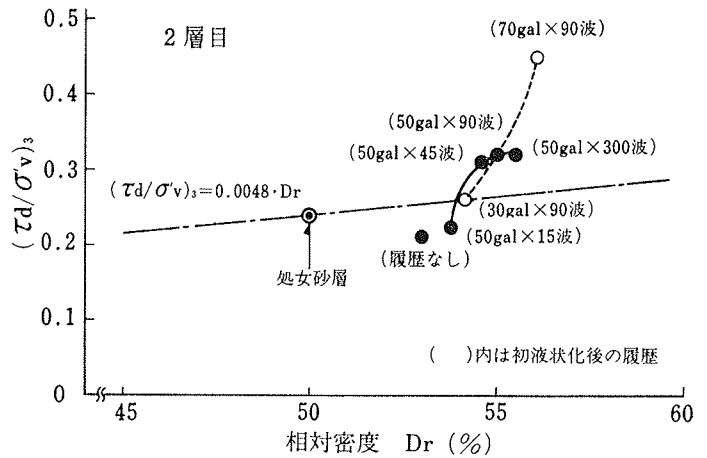


図-13 $(\tau_d/\sigma'_v)_3 \sim D_r$ 関係

であり、液状化する回数はそのほとんどが10回以下、特に2層目については5回以下であった。したがって、この報告における液状化抵抗としては、3回で液状化する応力比 $(\tau_d/\sigma'_v)_3$ を考えることにする。

処女砂層の液状化抵抗は図-6より、再液状化抵抗は図-9より、また、小ひずみ履歴を与えた場合の再液状化抵抗は図-11および図-12より求めることができる。これを相対密度 (D_r) に対してプロットしたのが図-13である。

ここで、履歴を与えることによって砂層は密度を増し、密度が増加すると液状化抵抗も大きくなることは明らかである。一般に、前述の $(\tau_d/\sigma'_v)_{20}$ あるいは $(\tau_d/\sigma'_v)_{10}$ と相対密度 (D_r) とは正比例関係にあるといわれており⁶⁾、振動台実験で得られた $(\tau_d/\sigma'_v)_3$ についても、この関係が成り立つものと考えられる。

したがって、図-13に示すように原点と処女砂層の $(\tau_d/\sigma'_v)_3$ を結ぶ直線が、密度増加に起因する液状化抵抗の増加と考えられる。

$$(\tau_d/\sigma'_v)_3 = 0.0048 \cdot D_r \quad \dots\dots\dots(3)$$

また、この直線を基準に再液状化抵抗を比較することによって、密度増加の影響を考慮することができる。

図-13からも明らかなように、履歴のない再液状化抵抗は、密度増加にもかかわらず、処女砂層の液状化抵抗よりも低くなっている。また、初液状化後の履歴によって再液状化抵抗は著しく増加していることがわかる。ただし、15波の履歴の場合は、その効果は非常に小さい。これは、図-7をみてもわかるように、2層目について、15波(5秒)の履歴を加えている間は、まだ砂層は完全に液状化状態を示しており、履歴効果が砂粒子に有効に作用していなかったためと考えられる。

6. おわりに

振動台を用いて、飽和砂層の再液状化特性に関して検討してきた。その結果、次のようなことが明らかとなった。

- (1) 初液状化後に全くひずみ履歴のない砂層の再液状化抵抗は、処女砂層の液状化抵抗よりも低くなる。
- (2) 初液状化後に続けて小ひずみ履歴を与えた場合、再液状化抵抗は著しく増加する。
- (3) 過剰間隙水圧が消散しきれていない時に小ひずみ履歴を与えても余り効果はない。

したがって、以前にその地点が液状化したか否かということだけで、現在、その地盤が液状化しやすくなっている、あるいはしにくくなっているとはいえず、以前の液状化の状態、例えば、液状化後に続く振動履歴の有無、あるいはその時の過剰間隙水圧によって、再液状化抵抗は大きく影響されるといえるようである。

参考文献

- 1) 栗林栄一, 他: 明治以降の本邦の地盤液状化履歴, 土木研究所彙報, 第30号, (1974)
- 2) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J.: Effect of Strain history on liquefaction of sand, ASCE, Vol. 96, No. SM 6, (1970), pp. 1917~1933
- 3) 大原資生, 他: 振動台による飽和砂の再液状化特性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol. 22, No. 2, (1982), pp. 123~132
- 4) 石原研而, 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回年次学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和52.10), pp. 243~244
- 5) 石原研而: 土質力学の基礎, 鹿島出版会, (1976)
- 6) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂, (1980)