北見工業大学研究報告
第14巻 第1号 (昭和57年)

Memoirs of the Kitami Institute of Technology
Vol. 14 No. 1 (1982)

飽和砂の液状化強度に及ぼすせん断履歴の影響*

鈴 木 輝 之**
土 岐 祥 介***

(昭和57年4月13日受理)

Effects of Stress History on the Liquefaction Resistance of Saturated Sand

by Teruyuki SUZUKI and Shosuke TOKI

It is a well known fact that stress history is one of the most important factors determining the liquefaction characteristics of sand. Consequently the liquefaction potential of a sand layer in the field can not be determined satisfactorily by laboratory cyclic shear tests on sand samples prepared at the same void ratio as in the field.

The purpose of this study is to obtain fundamental information on the effects of stress history on the liquefaction characteristics of saturated sand subjected to cyclic stresses. For this purpose, a series of liquefaction tests with constant amplitude cyclic stresses were performed on sand samples which had been previously subjected to simple stresses.

Through this study, it has been recognized that the effects of stress history on the liquefaction characteristics of saturated sand are brought about by fabric changes during preshearing, and that the character of these effects of stress history can be explained by the observations obtained during sterss reversal tests on dry sand.

1. まえがき

自然の砂地盤は，過去に地震荷重を受けていることが多く，場合によっては液状化を生じたり，あるいは液状化に至らないまでもかなりの間隙水圧の上昇を生じたりした経過を持つ。これに対し，砂の液状化強度は以前にせん断応力を受けることによって変化することが指摘され[1),2)]，砂地盤の液状化強度を評価する際，密度だけで砂の状態が決まるとする考え方に修正が必要になった。

以前に受けたせん断履歴の影響が液状化特性にどのように現われてくるかという問題はそれ程単純なものではなく，その現われ方についての十分な説明はいまだなされていない。

* 第36回土木学会年次学術講演会にて一部発表
** 北見工業大学土木工学科
*** 北海道大学工学部土木工学科

本実験では，せん断履歴の影響が液状化強度にどのように現われるかを明らかにする目的で，繰返し三軸試験機を用いて，単純化したせん断履歴を加えた供試体の液状化強度を調べた。その結果，せん断履歴の影響が現われる機構についていくつかの基礎的知見が得られたので報告する。

2. 実験内容

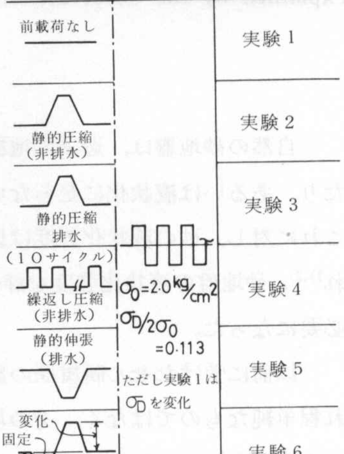
2.1 試料および供試体

用いた試料は豊浦砂で，一度水洗いした後，50〜60°C の温度で炉乾燥した。調整後の試料は，比重 $G_s=2.65$，最大間隙比 $e_{\max}=0.985$，最小間隙比 $e_{\min}=0.617$ であった。供試体の寸法は直径 50 mm，高さ 115 mm の円柱形とし，気乾状態で多重フルイ落下装置により作製した。供試体の成形後，次のような手順で飽和させた。先ず排水径路を利用して炭酸ガスを低流量で20〜30 分間通し，供試体間隙中の空気を炭酸ガスに置き換える。つぎに 1 m の水頭差の下で脱気水を約 1 時間通す。この脱気水を通す場合もできるだけ低流量で通すことが飽和度を高める要領の 1 つとなるようである。以上の手順で飽和させた供試体にさらに 1.5 kg/cm^2 のバックプレッシャーを加えた。この結果，B 係数の値は常に 0.96〜0.98 に維持することができた。なお供試体の初期相対密度 D_{ro} は，全実験を通して 50% で統一し，D_{ro} の目標値からのバラツキの許容範囲は ±2% とした。

実験装置は，電磁弁の切換えによる空気圧式繰返し三軸試験装置である[3]。したがって加わる繰返し荷重の波形は近似矩形波となる。このとき波形を立ち上りが急な矩形波にすると，実験結果が一般に用いられている正弦波による場合と異なることが考えられるので，載荷シリンダーへの空気の入口に絞り弁をつけて矩形波の角が落ちるように工夫した。

2.2 実験ケース

図–1 に実験 1〜実験 6 の 6 種類の載荷法を示す。この図に示すように実験 1 を除いて，載荷は所定のせん断応力を加えた後に再圧密するまでの前載荷と，その後非排水で規則的繰返し応力を加え液状化に至らせる再載荷とからなる。このとき前載荷，再載荷ともに，等方応力状態 ($\sigma_1=\sigma_3=\sigma_0=2.0$ kg/cm^2) から出発し，半径方向応力一定で，軸方向応力だけを変化させる方法によった。また実験 2〜6 の再載荷での荷重条件はすべて同じであり，応力比 $\sigma_D/2\cdot\sigma_0=0.113$ となる規則的繰返し軸差応力 σ_D を圧縮側と伸張側に交互に加えた。またこれらの再載荷および実験 4 の前載荷での載荷周期は 1 サイクル 2 秒とした。



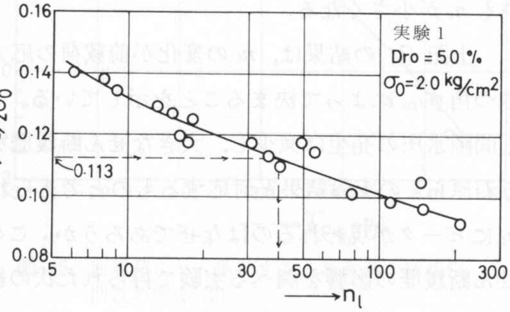
図—1　応力の加え方

3. 実験結果および考察

3.1 せん断履歴を受けていない供試体の液状化強度

せん断履歴を受けることによって液状化強度がどのように変化するかを調べるためには，先ず履歴を受けていない供試体の液状化強度を調べておく必要がある。

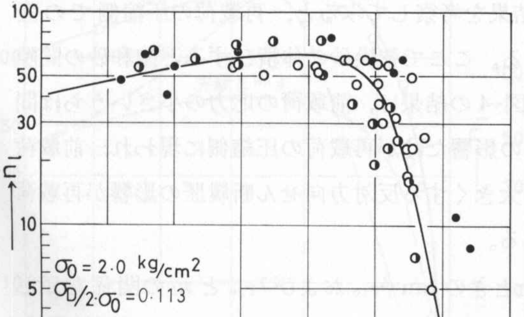
図-2は，実験1で得られた応力比 $\sigma_D/2\cdot\sigma_0$ と液状化回数 n_l の関係を示している。液状化を生じる載荷条件は供試体の初期状態が決まれば，$\sigma_D/2\,\sigma_0$ と n_l の2つの値で決まるので，液状化強さは n_l を固定しその n_l で液状化を生じる $\sigma_D/2\,\sigma_0$ で表わす場合が多い。しかし本実験の場合は再載荷での $\sigma_D/2\,\sigma_0$ を固定しているから，液状化強度の変化は n_l に反映されることになる。したがって以後においては n_l の変化を強度の変化とみなして考察を進める。なお図-2によれば，せん断履歴を受けていない供試体では，実験2～6の再載荷と同じ大きさの応力比 $\sigma_D/2\,\sigma_0=0.113$ の下では40回で液状化している。この液状化回数が前載荷の影響でどのように変化するかが以後の主な議論になる。



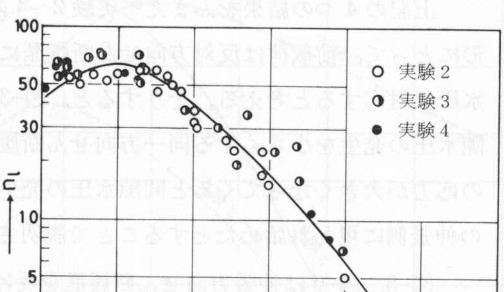
図―2 処女供試体の液状化強度

3.2 前載荷のせん断方向が一方向のみの場合

前載荷で圧縮応力を加える実験2～4の場合について，前載荷の最大有効動員まさつ角の正接 $\tan\phi'_{\mathrm{Pre}}$ と再載荷時の液状化回数 n_l の関係をプロットしたのが図-3である。また同実験において，n_l を前載荷の最大せん断ひずみ γ_{Pre} に対してプロットしたのが図-4である。これ



図―3 前載荷の応力と再載荷の液状化回数の関係 (1)



図―4 前載荷のせん断ひずみと再載荷の液状化回数の関係 (1)

らの図から次のようなことが分る。

(1) 前載荷で排水条件を変えたこと（実験2と実験3の違い），あるいは応力を繰返し加えるようにしたこと（実験2と実験4の違い）の影響はほとんど現われていない。

(2) 前載荷での応力あるいはひずみの増加とともに，n_l は最初増加しその後ピークが現われて減少に転じ，$\tan\phi'_{\rm Pre}=0.5$，$\gamma_{\rm Pre}=1.0\%$ を越えると，せん断履歴を受けていない供試体よりも n_l が小さくなる。

上記 (1) の結果は，n_l の変化が前載荷の応力径路にかかわりなく主として最大有効動員まさつ角 $\phi'_{\rm Pre}$ によって決まることを示している。また (2) の結果は，小さいせん断履歴を受けると間隙水圧の発生は減少し，大きなせん断履歴を受けると間隙水圧の発生は逆に増加するという石原ら[5]の実験結果と対応するものと考えられる。このように $\tan\phi'_{\rm Pre}$ の増加にともなって n_l にピークが現われるのはなぜであろうか。この点については，乾燥砂の体積ひずみに及ぼすせん断履歴の影響を調べる実験で得られた次の結果から説明されよう[6]。

(1) 等方応力状態を中心として載荷方向を圧縮側と伸張側に分けると，前載荷でのせん断方向が再載荷でのそれと同一であるか，反対方向であるかによって履歴の影響の現われ方が全く異なる。

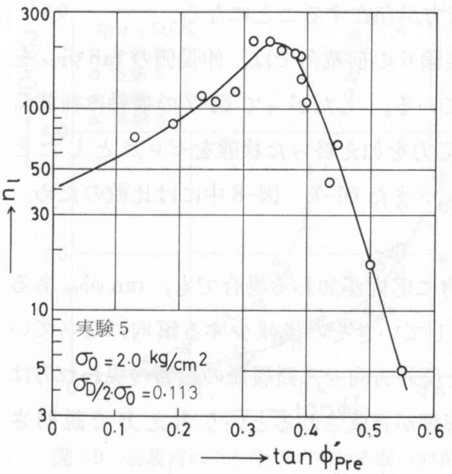
(2) いま，これらを同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴と呼ぶことにすると，同一方向せん断履歴の影響は再載荷での体積ひずみを小さくし，反対方向せん断履歴の影響はこの体積ひずみを大きくする形で現われる。

(3) 同一方向せん断履歴の影響は，以前に加えた応力が小さいうちから現われ始めるのに対して，反対方向せん断履歴の影響は，その応力がある程度大きくならないと現われない。

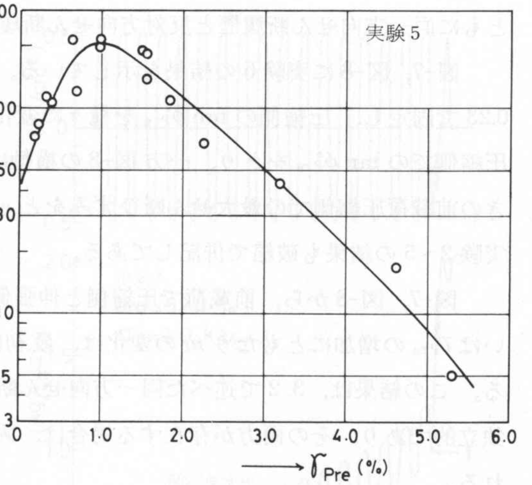
(4) 上記の2つのせん断履歴の影響は独立的に現われ，両方の履歴が同時に存在する場合は，その影響は重ね合わせた形で現われる。

上記の4つの結果をふまえて実験2～4の結果を考察してみると，再載荷の圧縮側での変形にとって，前載荷は反対方向せん断履歴になる。ここで乾燥砂の体積ひずみと飽和砂の間隙水圧は対応すると考える。そうすると，図-3，図-4の結果は，前載荷の応力の小さいうちは間隙水圧の発生を小さくする同一方向せん断履歴の影響だけが再載荷の圧縮側に現われ，前載荷の応力が大きくなってくると間隙水圧の発生を大きくする反対方向せん断履歴の影響が再載荷の伸張側に現われ始めたとすることで説明される。

図-5，図-6は伸張方向せん断履歴を受けたときの $\tan\phi'_{\rm Pre}$ および $\gamma_{\rm Pre}$ と n_l の関係を示している。これらの図から分るように，伸張方向せん断履歴を受けたときも，圧縮方向せん断履歴を受けたときと同様に，n_l の変化は前載荷応力の増加とともに最初増加し，その後ピークを経て減少に転じている。前述した圧縮方向せん断履歴の影響の現われ方に関する説明は，せん断方向を入れ換えることでそのまま伸張方向せん断履歴を受けた場合に適用されると考えられる。したがって図-5，図-6の n_l の変化の傾向は，図-3，図-4のそれと同質のものとして良い



図—5　前載荷の応力と再載荷の液状化回数の関係 (2)

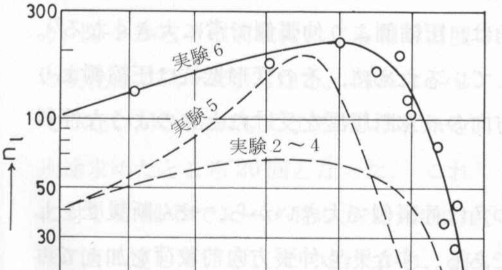


図—6　前載荷のせん断ひずみと再載荷の液状化回数の関係 (2)

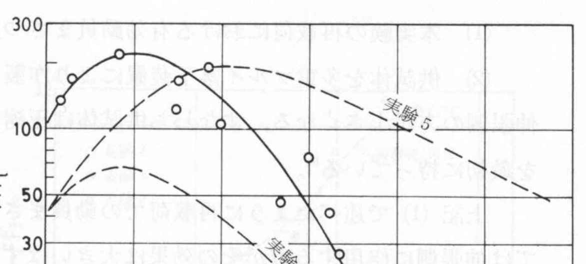
であろう。しかし図-3，図-4 の曲線と図-5，図-6 の曲線とは一致している訳ではない。この比較については次節で述べる。

3.3　前載荷が圧縮および伸張の両方向の場合

これまで述べてきた図-3～6 においては，たとえば圧縮側の前載荷を受けた場合，再載荷圧縮側の応力による変形では同一方向せん断履歴だけが存在し，一方伸張側の応力による変形では反対方向せん断履歴だけが存在している。すなわち再載荷の圧縮側と伸張側の各々で同一方向せん断履歴か反対方向せん断履歴のどちらか一方だけが存在する形となっている。これに対して実験 6 では前載荷に圧縮応力と伸張応力の両方があるので，再載荷では圧縮側，伸張側



図—7　前載荷の応力と再載荷の液状化回数の関係 (3)



図—8　前載荷のせん断ひずみと再載荷の液状化回数の関係 (3)

ともに同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴の両方が存在することになる。

図-7, 図-8に実験6の結果を示している。なお実験6の前載荷では，伸張側の $\tan\phi'_{Pre}$ を0.23で固定し，圧縮側の $\tan\phi'_{Pre}$ を種々に変化させている。したがって図-7の横軸は前載荷圧縮側での $\tan\phi'_{Pre}$ をとり，一方図-8の横軸は伸張応力を加え終った状態をゼロ点としたときの前載荷圧縮側での最大せん断ひずみをとっている。また図-7, 図-8中には比較のため，実験2～5の結果も破線で併記してある。

図-7, 図-8から，前載荷で圧縮側と伸張側の両方に応力が加わる場合でも，$\tan\phi'_{Pre}$ あるいは γ_{Pre} の増加にともなう n_l の変化は，最初は増加していきその後減少する傾向になっている。この結果は，3.2で述べた同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴の影響の現われ方は独立的であり，その両方が存在する場合は，両者の影響が合成されるという考え方で説明される。

いま，図-7, 図-8における実験2～4の曲線と実験6の曲線の比較をしてみる。実験6の前載荷の応力条件は，実験3の前載荷応力に $\tan\phi'_{Pre}=0.23$ の伸張応力を付加した形とみなすことができる。ここで前述の同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴の影響の重ね合わせができるという考え方を導入すれば，実験6の再載荷時の液状化回数は実験2～4のそれに比べて，前載荷で付加した伸張応力の影響分だけ大きくなる。

つぎに図-7, 図-8の実験2～4の曲線と実験5の曲線を比較してみると，n_l のピーク値と γ_{Pre} の大きさに明らかな違いが見られる。この両者の載荷条件の違いは，前載荷の方向が逆になることである。この違いによってなぜ両曲線に大きな違いが現われるかを考えてみる。これを説明するためには，3.2で述べたせん断履歴の影響の現われ方の他にすでに得られている次のような知見が有効であろう。

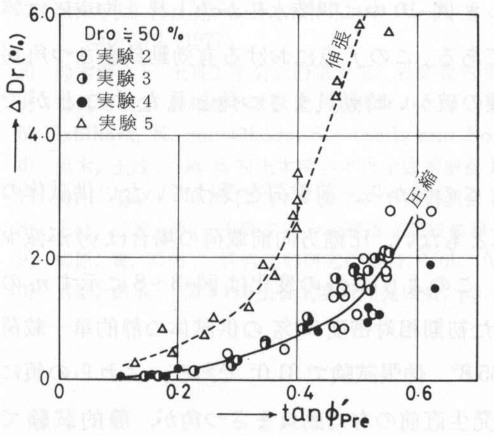
(1) 本実験の再載荷における有効動員まさつ角は，圧縮側より伸張側で常に大きくなる[7]。

(2) 供試体を多重フルイ落下装置により作製しているために，その変形抵抗は圧縮側より伸張側の方が小さくなる。すなわち供試体は圧縮方向のせん断履歴を受けたときのような性質を最初に持っている[8]。

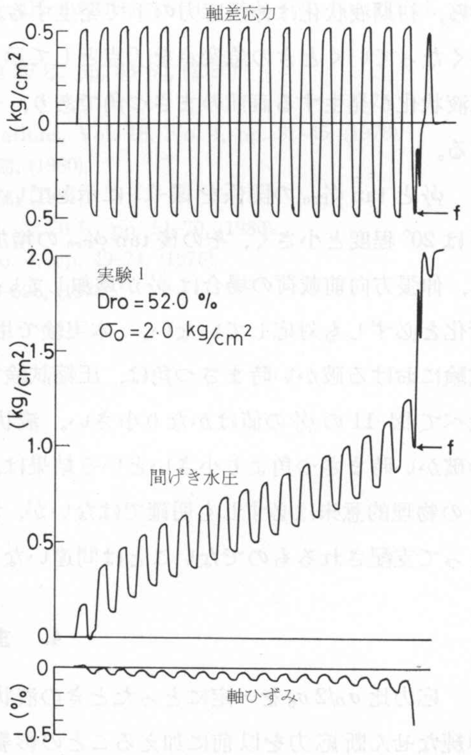
上記 (1) で述べたように再載荷での動員まさつ角は伸張側で大きいから，せん断履歴としては伸張側に作用する方がその効果は大きいはずである。すなわち伸張方向前載荷を加えて再載荷伸張側での間隙水圧の減少を計る方が n_l のピーク値は大きくなる。また図-8で実験5の γ_{Pre} が大きくなっているのは，上記 (2) で述べた供試体の初期粒子配列構造の特性によると思われる。

3.4 前載荷における密度変化の影響

これまで図-3～6においては，n_l に対するせん断履歴の影響の現われ方をもっぱら粒子構造の変化によるとする観点でとらえてきた。しかし前載荷によって密度の変化も生じているので，この影響が前載荷の影響に占める割合がどの程度のものであるかを確かめておく必要があ



図—9　前載荷により生じた相対密度の変化



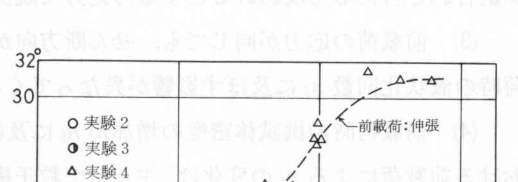
図—10　液状化試験の記録例

ろう。

図-9 は前載荷によって生じた相対密度の変化 ΔD_r と $\tan\phi'_{\mathrm{Pre}}$ の関係を示している。この図から本実験の前載荷の範囲では，$\tan\phi'_{\mathrm{Pre}}$ の増加とともに相対密度は増加一方の変化をしていることが分る。供試体密度の増加は液状化強度の増加をもたらすのであるから，図-3～8 において $\tan\phi'_{\mathrm{Pre}}$ あるいは γ_{Pre} の増加にともない n_l が最初増加しその後減少に転じるという変化の全体を，前載荷における密度の変化だけで説明できないことは明らかである。そこで図-5 において n_l がピークになる点に着目してみる。このとき $\tan\phi'_{\mathrm{Pre}} \doteqdot 0.35$ であり，図-9 からその前載荷による相対密度の変化は $\Delta D_r = 2\%$ となる。図には示していないがこの ΔD_r による n_l の増加を別途求めたところ20回となった。これに対して図-5 でピーク時の n_l の増加は160回に達している。この結果から，前載荷における密度の変化が図-3～8 に示す n_l の変化に寄与する割合はきわめて小さいと言える。

3.5　液状化発生時の動員まさつ角

図-10 は，実験 1 における液状化試験の記録例を示す。前述のように再載荷では伸張側の動員まさつ角が大きくなる



図—11　液状化発生直前の有効動員まさつ角

から，初期液状化は伸張応力の下で発生する。いま図-10 中に間隙水圧が急上昇し拘束圧に等しくなっていくときの急変点を f 点として示してある。この f 点における有効動員まさつ角 ϕ'_f は液状化が発生する直前のまさつ角であり，一種の破かい時動員まさつ角と見なすことができる。

ϕ'_f と $\tan\phi'_{Pre}$ の関係を図-11 に示している。この図から，前載荷を受けていない供試体の ϕ'_f は 20° 程度と小さく，その後 $\tan\phi'_{Pre}$ の増加にともない，圧縮方向前載荷の場合は ϕ'_f が減少し，伸張方向前載荷の場合は ϕ'_f が増加している。このように ϕ'_f の変化は図-3～8 に示す n_l の変化と必ずしも対応していない。本実験で用いた初期相対密度 50% の供試体の静的単一載荷試験における破かい時まさつ角は，圧縮試験で 35.8°，伸張試験で 31.0° である。これらの値に比べて図-11 の ϕ'_f の値はかなり小さい。液状化発生直前の有効動員まさつ角が，静的試験での破かい時まさつ角より小さいという結果は，梅原ら[9]，大原ら[10] によっても報告されている。ϕ'_f の物理的意味は必ずしも明確ではないが，液状化の発生がその供試体の持つ最大まさつ角によって支配されるものでないことは間違いないようである。

4. ま と め

応力比 $\sigma_D/2\sigma_0$ を一定にとったときの液状化回数 n_l の変化を液状化強度の変化とみなし，単純なせん断応力を以前に加えることの影響が n_l にどのように表われるかを調べた。主な結果は次のようになる。

(1)　前載荷のせん断方向にかかわらず，応力が増加するとともに n_l は最初増加し，その後ピークを経て減少に転じるという変化の傾向を示す。

(2)　上記の現象は，せん断履歴の影響が同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴の影響が組合わさった形で現われるとする考え方で説明される。

(3)　前載荷の応力が同じでも，せん断方向が圧縮側であるか伸張側であるかによって再載荷時の液状化回数 n_l に及ぼす影響が異なってくる。

(4)　前載荷時の供試体密度の増加が n_l に及ぼす影響は非常に小さなものであり，本実験における前載荷による n_l の変化は，主として粒子構造の変化によってもたらされたものと見なすことができる。

(5)　初期液状化が発生する直前の有効動員まさつ角はせん断履歴によって変化する。しかし，この値は液状化を支配する要素とはなっていないようである。

最後に実験に協力してくれた元本学学生，鈴木政輝君，中山秀紀君に感謝致します。

文　献

1) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J.: Journal of SMFD, ASCE, Vol. 96, No. SM 6, pp. 1917–1933, (1970).

2) Seed, H. B., Mori, K. and Chan, C. K.: Journal of GED, ASCE, Vol. 103, No. GT 4, pp. 257-270, (1977).

3) 鈴木輝之: 土質工学会北海道支部, 技術報告集, 第20号, pp. 55-60, (1980).

4) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂.

5) Ishihara, K. and Okada, S.: Soils and Foundations, Vol. 18, No. 4, pp. 31-45, (1978).

6) 鈴木, 土岐: 第35回土木学会年次学術講演会III部, (1980).

7) 鈴木, 土岐: 第36回土木学会年次学術講演会III部, (1981).

8) 土岐, 三浦, 稲: 土質工学会北海道支部技術報告集, 第20号, pp. 61-70, (1980).

9) 梅原, 善, 浜田: 洪湾技術研究所報告, Vol. 15, No. 4, pp. 49-74, (1976).

10) 大原, 山本: 第13回土質工学研究発表会, pp. 525-528, (1978).