

# 液状化による地盤沈下の簡易予測に関する研究

鳥井原 誠 山田 祐 樹

## Simplified Estimation of Settlements due to Reconsolidation Following Liquefaction

Makoto Toriihara Yuuki Yamada

### Abstract

This paper describes results of volume compression tests on sand containing fines, and estimated settlements due to reconsolidation following liquefaction. Two kinds of sandy soils with different grain size distributions were used, and the effects of fines in measuring volume change causing dissipation of excess pore water pressure following liquefaction was evaluated. The results were as follows. Volumetric strain following liquefaction depended on shear strain, but was independent of the amount of fines. Volumetric strain was estimated from void ratio. We can estimate the settlements of sand containing fines by the traditional method for clean sand where we evaluate volumetric strain by void ratio.

### 概 要

本報告は、細粒分を含んだ砂地盤の液状化による沈下量の簡易予測方法についてまとめたものである。同一の材料を母材として細粒分含有率の異なる2種類の試料を作成し、液状化後の水圧の消散に伴う体積変化量の測定を行うことにより、細粒分含有率が液状化時の沈下特性に与える影響について考察を行った。その結果、液状化後の体積ひずみは、液状化時のせん断ひずみに大きく依存しているが、細粒分の有無に係わらず空隙比により一意的に求まることが明らかとなった。また、砂の空隙比で整理すれば、従来までの細粒分含有率の少ない砂の沈下量予測手法が、細粒分を多く含む砂についても適用可能であることがわかった。

### 1. はじめに

地下水位以下の緩い砂質地盤に地震動が加わると、地盤内に過剰間隙水圧が発生し、有効応力が失われ、地盤の液状化が発生する。地震後、Fig. 1に示すように発生した過剰間隙水圧は消散し、それに伴い地盤は再び圧密されて固さを取り戻すと同時に地盤沈下が生じる。この沈下量が大きい場合、深い基礎で支えられた構造物との間に段差を生じたり、基礎の剛性が不足する構造物では不同沈下によって上部構造が損傷を受けることもある。

液状化による砂地盤の沈下特性に関する研究<sup>1)</sup>としては、これまでは細粒分含有率の少ない砂に限定されてきており、細粒分が多くなることによる影響に関する研究はほとんどなされていない。

一方、兵庫県南部地震において、これまで液状化しにくいと考えられていた細粒分を含んだ砂や礫混じり砂についても液状化の発生が確認されており、その後の各種基準・指針等の見直しによってこれらの砂についても液

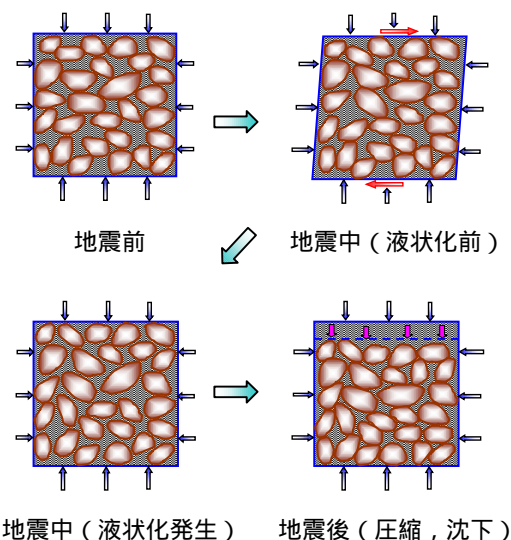


Fig. 1 液状化時の沈下メカニズム  
Mechanism of Settlements Following Liquefaction

状化の対象地盤として判定を行うよう改訂がなされた。

ところが、細粒分を多く含んだ砂や礫混じり砂については、沈下特性に関する報告はほとんど無く、予測手法も確立していないのが現状である。したがって、それらの砂について液状化に伴う沈下特性を把握することは、液状化時の基礎の設計、あるいは重要構造物等の設計において有効であると考えられる。

そのため、本研究では同一の材料を母材とした細粒分含有率の異なる2種類の試料を作製し、三軸試験装置を用いた繰返し非排水三軸試験を行い、載荷終了後の過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化量を測定することにより、細粒分含有率が液状化時の沈下特性に与える影響について検討を行った。

## 2. 体積圧縮試験

### 2.1 試験概要

今回、細粒分含有率が液状化時の沈下特性に与える影響を評価することを目的として、以下に示す3つの条件をパラメータとして体積圧縮試験を行った。

- 1) 細粒分含有率 (2種類)
- 2) 間隙比 (3種類)
- 3) 液状化試験時の繰返し応力振幅比 (10種類程度)

### 2.2 試験方法

2.2.1 試験試料と供試体作製方法 試験に用いた試料は、細粒分含有率が19.6%の山砂Aおよび山砂Aから0.075mm以下を水洗いにより除去した細粒分含有率0%の山砂Bの2種類である。試験試料の基本物性をTable 1に示す。また、Fig. 2に各試料の粒径加積曲線を示す。ここで、山砂Aの最小・最大密度試験結果については、試験基準(JIS A 1224)の適用範囲外の粒径であるため、参考値として掲載している。

今回の試験に用いた供試体寸法は直径50mm、高さ100mmであり、各試料とも3種類の異なる間隙比となるように供試体作製方法を決定している。以下に作製方法を示す。

(1) 山砂Aの供試体作製方法 細粒分を含む山砂Aについては、予備試験において乾燥状態で作成した供試体が三軸試験時の拘束圧付加によって密度が大幅に増加することが明らかとなったため、以下に示す3種類の方法で供試体の作製を行った。

- 方法1(緩詰め) : 空中落下法(落下高さ0cm)  
 方法2(中密詰め) : 空中落下法 + 振動締固め  
 空中落下法で試料投入後、振動バイブレータを用い、3分間の加振を行う。  
 方法3(密詰め) : 静的締固め  
 5cmのモールド内に所定の間隙比になるよう試料を投入し、全断面ピストンを介して静的圧縮装置により締固めを行う。

(2) 山砂Bの供試体作製方法 山砂Aの細粒分を除去した山砂Bについては、空中落下法を用いて供試体の

作製を行った。予備試験結果から乾燥密度と落下高さの関係を把握し、以下の3種類の落下高さによって供試体の作製を行った。

- 方法1(緩詰め) : 空中落下法(落下高さ10cm)  
 方法2(中密詰め) : 空中落下法(落下高さ30cm)  
 方法3(密詰め) : 空中落下法(落下高さ50cm)

2.2.2 試験手順と繰返し載荷方法 Fig. 3に試験およびデータ整理のフロー図を示す。供試体の作製終了後、脱気水、炭酸ガスおよび背圧を用いて供試体を飽和させ、有効拘束圧  $\sigma'_0=98\text{kPa}$  で等方圧密を行っている。それぞれの作製方法で得られた供試体の等方圧密後の平均間隙比

Table 1 基本物性  
Soil Properties

	山砂A	山砂B
土粒子密度 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	2.736	2.746
細粒分含有率 (%)	シルト分	14.10
	粘土分	5.50
平均粒径 $D_{50}$ (mm)	0.24	0.28
最大密度 $d_{\text{max}}$ ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	1.446	1.595
最小密度 $d_{\text{min}}$ ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	1.134	1.304
最大間隙比 $e_{\text{max}}$	1.413	1.106
最小間隙比 $e_{\text{min}}$	0.892	0.722

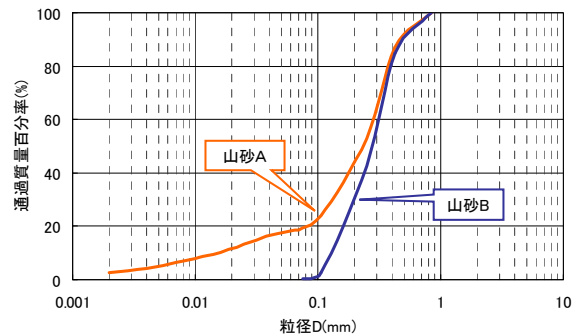


Fig. 2 粒径加積曲線  
Grain Size Distribution Curve

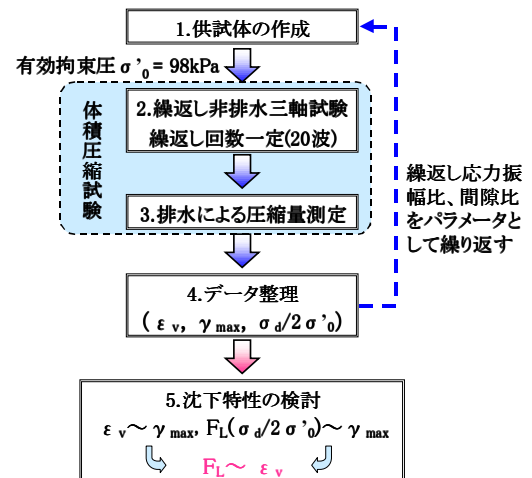


Fig. 3 試験およびデータ整理のフロー図  
Flow chart of Examination and data analysis

Table 2 等方圧密後の平均間隙比  
Mean Void Ratio after Consolidation

試料名	試験ケース	平均間隙比
山砂A	緩詰め : 空中落下法 (0cm)	0.97
	中密詰め : 空中落下法 (0cm)	
	中密詰め + 振動締め	0.90
	密詰め : 静的締め	0.73
山砂B	緩詰め : 空中落下法 (10cm)	0.88
	中密詰め : 空中落下法 (30cm)	0.84
	密詰め : 空中落下法 (50cm)	0.78

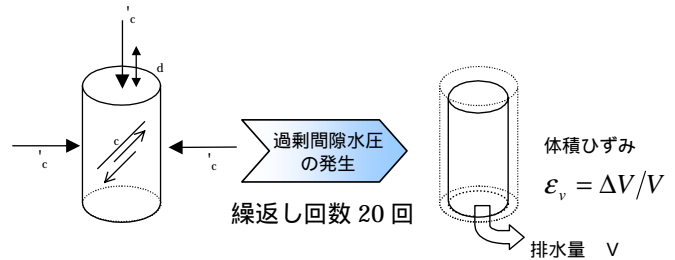


Fig. 4 体積圧縮試験の概念図

Outline of Volume Compression Test

をTable 2に示す。

Table 2に示したそれぞれの試験ケースについて、繰返し応力振幅比を10種類程度変化させた体積圧縮試験を行った。試験には繰返し三軸試験装置を使用した。試験方法としては、等方圧密後、周波数0.1Hzの正弦波を用いて、繰返し回数を一定(20回)にした繰返し非排水三軸試験を行っている。繰返し載荷終了後、排水コックを開けて過剰間隙水圧を消散させ、それに伴う体積変化量の測定を行った。体積圧縮試験の概念図をFig. 4に示す。

試験結果は、それぞれの軸差応力  $\sigma_d$ 、軸ひずみ  $\epsilon_1$  および過剰間隙水圧  $u$  の時刻歴波形を整理し、繰返し回数20回目の値を読み取っている。また、本文中で使用している最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  および体積ひずみ  $\epsilon_v$  は、次式によって算出している。

$$\gamma_{max} = 1.5 \cdot \epsilon_{1DA} / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon_v = \Delta V / V \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\epsilon_{1DA}$  : 繰返し回数20回目の両振幅軸ひずみ  
 $\Delta V$  : 過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化量  
 $V$  : 試験前の供試体体積

### 3. 体積圧縮試験結果

#### 3.1 波形データ

Fig. 5, 6にそれぞれ山砂Aおよび山砂Bの軸差応力、軸ひずみ、過剰間隙水圧の時刻歴波形を示す。

いずれのケースも繰返し回数が20回目で両振幅軸ひずみが10%を超えた試験結果であるが、等方圧密後の間隙比は山砂Aが0.874、山砂Bが0.900と、その値は比較的近いものにも係わらず、山砂Aでは繰返し応力振幅比が0.273、山砂Bでは0.167と0.1以上の差が生じている。

次に、軸ひずみおよび過剰間隙水圧の時刻歴波形に着目すると、細粒分を含む山砂Aでは、繰返し回数9回目で70kPa付近まで水圧が上昇しており、初期の水圧上昇は早いものの、98kPaに達するのは19回目付近と、その後の水圧上昇は比較的遅い。また、軸ひずみにおいてもその傾向は同様であり、繰返し回数9回目付近からひずみが顕著に現れ、その後徐々に増加している。それに対し細粒分を含まない山砂Bでは、過剰間隙水圧が70kPaに達するのは繰返し回数16回目付近と山砂Aに比較して遅くなって

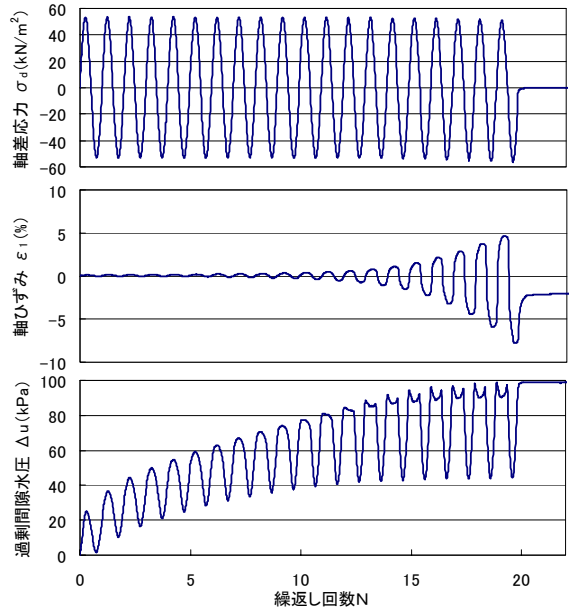


Fig. 5 時刻歴波形

(山砂A 中密詰め e=0.874 繰返し応力振幅比0.273)

Time Histories of Specimen A

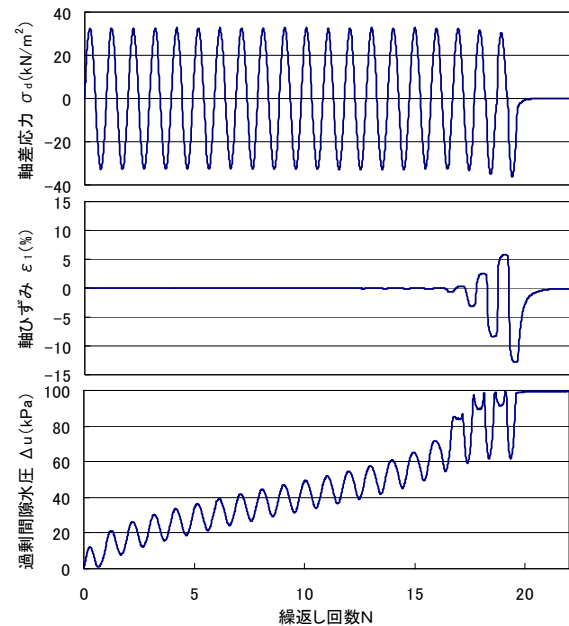


Fig. 6 時刻歴波形

(山砂B 緩詰め e=0.900 繰返し応力振幅比0.167)

Time Histories of Specimen B

いるにも係わらず、繰返し回数19回目には98kPaまで急激に上昇し、液状化に至っている。その傾向は軸ひずみにも同様に現れており、繰返し回数18回目以降、明確にひずみが生じはじめると急激に増加している。これらのことから、細粒分含有率の違いにより、両振幅軸ひずみが10%を超える繰返し応力振幅比や過剰間隙水圧の上昇過程が大きく異なるといえる。

3.2 体積ひずみと最大せん断ひずみの関係

Fig. 7にそれぞれ山砂Aおよび山砂Bの体積ひずみ  $\epsilon_v$  と最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  の関係を示す。実線が今回の試験結果であり、破線が石原ら<sup>1)</sup>の結果である。また、図中には20波以内早い段階で最大せん断ひずみが15%近くまで増加してしまった試験結果についても( )、( )、( )として参考までにプロットしている。

細粒分を含む山砂Aの試験結果に着目すると、試験時に受ける最大せん断ひずみが大きくなるに従い、過剰間隙水圧の消散に伴う体積ひずみが増加する傾向が伺える。このことから、過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化量は最大せん断ひずみに大きく依存しているのがわかる。

以上の傾向は細粒分を含まない山砂Bおよび石原らの試験結果にも現れており、細粒分の有無に係わらず同様な傾向を示している。しかも、いずれの試験ケースにおいても試験時に受ける最大せん断ひずみがおおよそ9%を超えたあたりから、体積ひずみの増加量が低下し、ほぼ一定の値を示しているのがわかる。また、その値は等方圧密後の間隙比の大きさによって異なっている。このことから、液状化後の体積ひずみは液状化時のせん断ひずみに大きく依存し、その大きさおよび最大値は間隙比によって異なるといえる。

3.3 間隙比による最大体積ひずみの推定

3.2節の結果を踏まえ、間隙比に着目し、整理を行ったのがFig. 8である。Fig. 7に示した試験結果の内、最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  が9%を超えるケースに関する体積ひずみ  $\epsilon_v$  と間隙比の関係を示している。図から明らかなように、山砂Aおよび山砂Bの試験結果は、細粒分の有無に係わらず、間隙比が大きくなるに従い体積ひずみの最大値が増加する傾向は同様であり、山砂A、Bとも若干のパラツキが見られるもののそれぞれ一つの曲線上に収束しているのがわかる。また、Fig. 9はFig. 8に石原らおよび国生ら<sup>2)</sup>の試験結果を加筆したものであるが、他の試験結果においても同様の傾向が現れており、これらの試験結果はほぼ同一線上に位置しているといえる。これらのことから、液状化後の最大の体積ひずみは、細粒分の有無に係わらず間隙比に大きく依存していることがわかる。したがって、細粒分を多く含む砂でも間隙比が分かれば、液状化による沈下量もある程度予測できることが推察される。ちなみに、Fig. 7, 8に示す各間隙比ごとの体積ひずみの最大値は、Fig. 9に示す各試料毎の試験結果の近似曲線を用いて算出したものである。

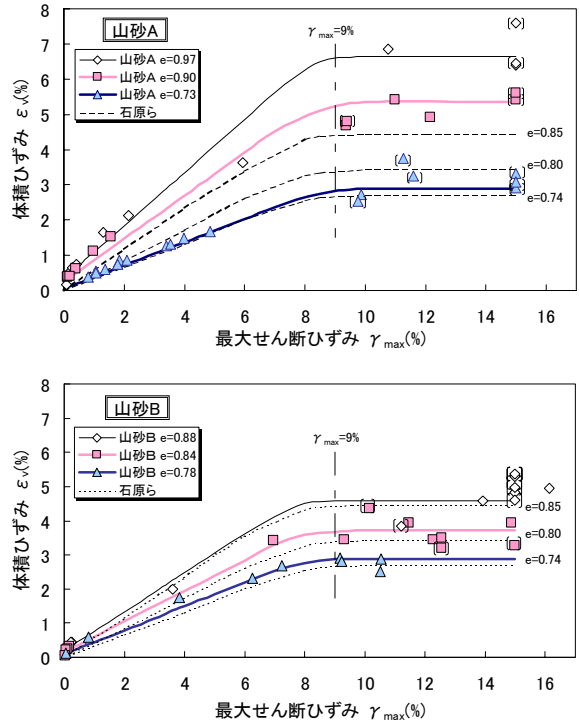


Fig. 7 体積ひずみと最大せん断ひずみの関係  
Relationship between Volumetric Strain and Maximum Shear Strain

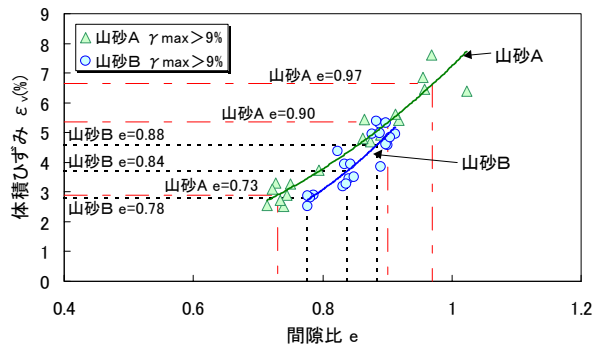


Fig. 8 最大体積ひずみと間隙比の関係  
Relationship between Volumetric Strain and Void Ratio

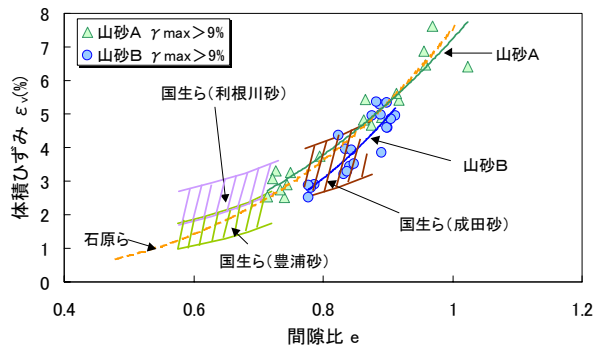


Fig. 9 他の試験結果との比較  
Comparison with another Results

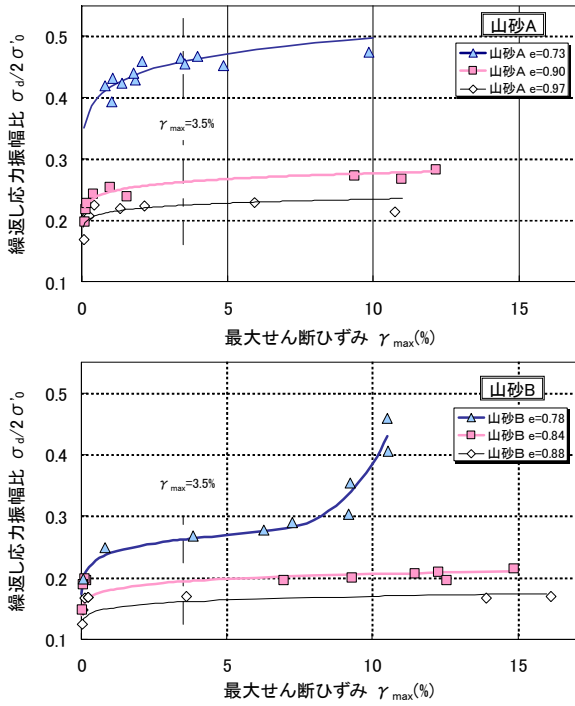


Fig. 10 繰返し応力振幅比と最大せん断ひずみの関係  
Relationship between Stress Ratio and Maximum Shear Strain

3.4 繰返し応力振幅比と最大せん断ひずみの関係

次に、繰返し非排水三軸試験における繰返し応力振幅比  $\sigma_d/2\sigma_0$  と最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  の関係をFig. 10に示す。いずれのケースにおいても試験時の繰返し応力振幅比が大きくなるに従い、最大せん断ひずみも増加しており、曲線の勾配が右上がりになる傾向が伺える。また、両ケースとも間隙比が小さくなるに従い、繰返し応力振幅比が大きくなる傾向を示している。

次に、各曲線毎に最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}=3.5\%$  (両振幅軸ひずみ  $\gamma_{1DA}=5\%$ ) となる繰返し応力振幅比を液状化強度Rとし、細粒分の有無によるその大きさの違いを比較してみると、山砂Bの液状化強度に対して、山砂Aは全体的に液状化強度が大きくなる傾向を示している。その差を間隙比がほぼ同じ値となる山砂Aの中密詰めケース (e=0.90) と山砂Bの緩詰めケース (e=0.88) で比較すると、山砂Aの中密詰め (R=0.263) の方が山砂Bの緩詰め (R=0.166) より約1.6倍程度液状化強度が大きくなっているのがわかる。このことは、間隙比により算出される液状化後の体積ひずみの量は同程度でも、細粒分含有率の影響によってその液状化強度は大きく異なることを現している。

3.5 液状化に対する抵抗率と最大せん断ひずみの関係

Fig. 10に示す各ケースの曲線における最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}=3.5\%$  の繰返し応力振幅比を液状化強度Rとし、液状化に対する抵抗率  $F_L$  の算出を次式により行った。

$$F_L = \frac{\text{液状化強度 } R}{\text{試験に用いた繰返し応力振幅比}} \dots\dots\dots (3)$$

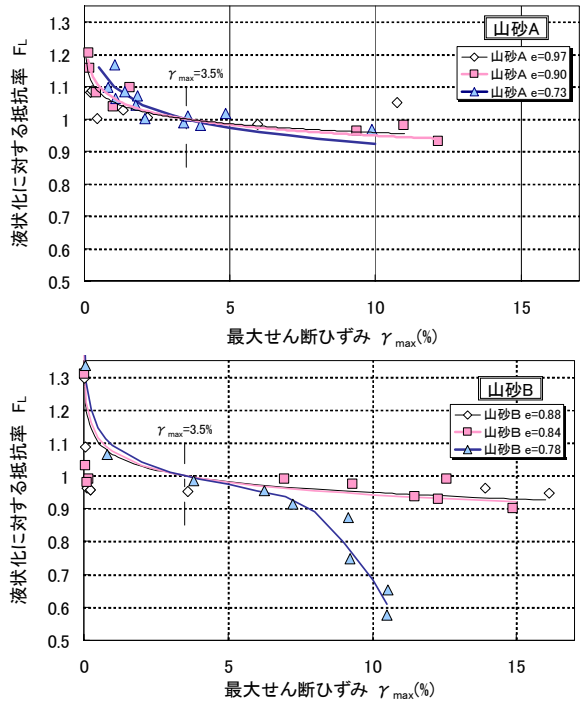


Fig. 11 液状化に対する抵抗率と最大せん断ひずみの関係  
Relationship between Factor of Safety for Liquefaction and Maximum Shear Strain

山砂Aおよび山砂Bにおける液状化に対する抵抗値  $F_L$  と最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  の関係をFig. 11に示す。

液状化に対する抵抗率で整理を行うと、山砂A, Bとも最大せん断ひずみが3.5%未満では、間隙比が小さくなる程、最大せん断ひずみが大きくなっている。また、最大せん断ひずみが3.5%を超えると、間隙比が小さいものほど最大せん断ひずみが小さくなっている。この傾向は細粒分の有無に係らず同様である。

3.6 液状化に対する抵抗率と体積ひずみの関係

Fig. 7およびFig. 11を用いて得られた山砂Aおよび山砂Bの液状化に対する抵抗率  $F_L$  と体積ひずみ  $\gamma_v$  の関係をFig. 12に示す。図中の破線は、石原らの提案曲線である。

細粒分を含む山砂Aの試験結果に着目すると、液状化に対する抵抗率が1.1以上の 경우에는 間隙比の差による体積ひずみの違いはほとんど見られないが、1.0を下回るあたりから、間隙比による差が徐々に現われ始めている。また、間隙比が小さくなるに従い体積ひずみも小さくなっており、その傾向は石原らの試験結果と良く対応している。

次に、細粒分を含まない山砂Bの試験結果をみると、間隙比が小さくなるに従って体積ひずみが小さくなる傾向は山砂Aと同様である。また、間隙比が小さな密詰めケースにおいては、石原らの試験結果と同様に、液状化に対する抵抗率が急激に低下する傾向が現れている。

これらの試験結果を全体的に評価すると、間隙比に着目すれば、細粒分を多く含む地盤についても従来の沈下予測手法の考え方を適用することによって沈下量を予測

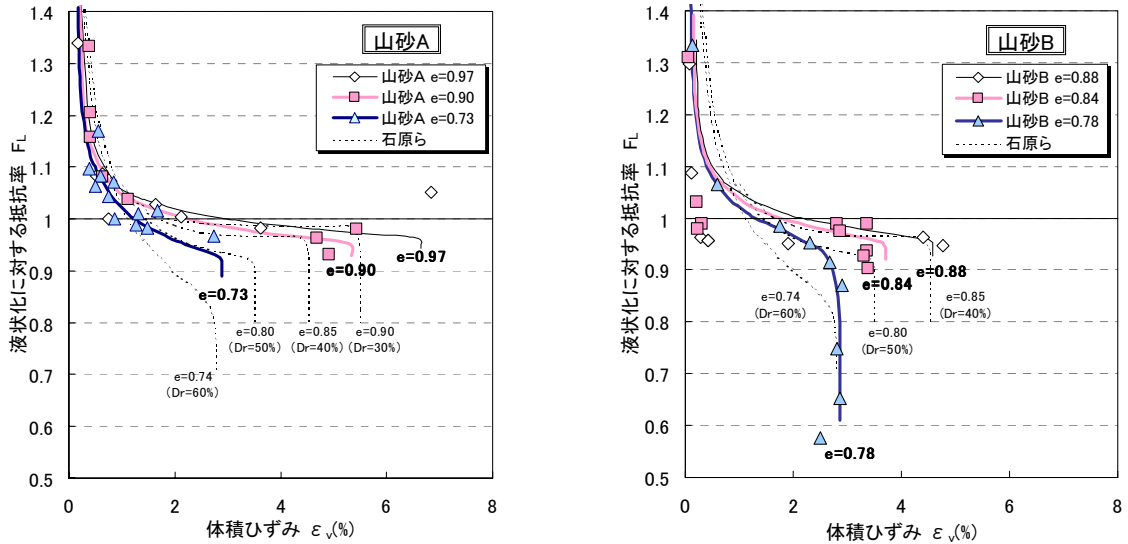


Fig. 12 液状化に対する抵抗率と体積ひずみの関係

Relationship between Factor of Safety for Liquefaction and Volumetric Strain

することが可能であることがいえる。

Fig. 13は兵庫県南部地震後のポートアイランドおよび六甲アイランドにおける地盤改良域と非改良域の沈下量の実積データの例を示している<sup>3)</sup>。この図から、地盤の改良程度に応じて地震終了後の沈下量が異なることがわかる。これは、地盤改良により間隙比が減少し、液状化に対する抵抗が増したためと考えられ、Fig. 12と良い対応を示している。

また、Table 3はFig. 12の山砂Aの試験結果を用いて、間隙比と液状化に対する抵抗率から沈下量を算出した例を示している。ここで、沈下量の計算は対象層厚が20mの場合を想定している。この表に示すように、対象となる地盤の間隙比と液状化に対する抵抗率( $F_L$ )が求めれば、液状化の程度に応じた地盤の沈下量を算出することが可能であることがわかる。

#### 4. おわりに

砂地盤が液状化した際の沈下量を簡易的に予測する手段として、従来から石原らの提案手法がよく用いられてきたが、この手法は元々、細粒分含有率の少ない砂を対象とした試験結果から求められたものであるため、細粒分が多い地盤の場合にはやや問題があった。

そのため、本研究では細粒分を多く含む砂を主な対象として体積圧縮試験を行い、以下に示すことが明らかとなった。

- 1) 液状化後の体積ひずみは、液状化時のせん断ひずみに大きく依存している。
- 2) 細粒分の有無に係わらず、間隙比により液状化後の最大体積ひずみを評価できることがわかった。
- 3) 砂の間隙比で整理すれば、細粒分の有無に係わらず細粒分含有率の少ない砂の予測と同様の手法を用いて液状化の程度に応じた沈下量の予測が可能であることがわかった。

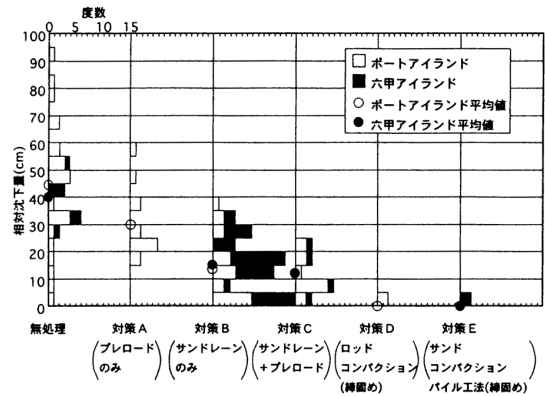


Fig. 13 地震時沈下量と地盤改良工法<sup>3)</sup>  
Comparison of Ground Subsidence in Zones Treated with Different Method

Table 3 沈下量の算出例  
Calculation of Settlements

	間隙比 e		
	0.7	0.8	0.9
$F_L=1.1$	10	10	11
$F_L=1.0$	22	33	47
$F_L=0.9$	51	76	107

単位: cm

#### 参考文献

- 1) Kenji Ishihara, Mitsutoshi Yoshimine: Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes, SOILS AND FOUNDATION Vol.32, pp.173-188, (1992)
- 2) 国生 剛治, 長崎 清: 密な砂地盤の液状化後の沈下特性, 第19回土質工学研究発表会, pp.563-566, (1984)
- 3) 阪神・淡路大震災調査報告書: (社)地盤工学会, pp.171-228, (1996)