

砂～レキの液状化特性に関する研究

浜野正光 大井高志
鳥井原誠 平間邦興

Study on the Liquefaction Properties of Sand and Gravel

Masamitsu Hamano Takashi Ooi
Makoto Toriihara Kunioki Hirama

Abstract

This paper discussed the results of two studies concerning the liquefaction of sand and gravel. First, the influence of grain size on liquefaction strength and modulus of deformation was investigated by carrying out liquefaction and dynamic deformation tests on a medium sized cyclic triaxial apparatus using four kinds of sand and gravel. Secondly, liquefaction of sand using a torsional test apparatus was verified by simulation of the effective stress method of program code 「EFECT」 developed by our corporation.

The following conclusions were drawn; ① Grain size increases liquefaction strength but the strength converges to a constant value; ② A unique relationship exists between liquefaction strength and the compression index of the isotropic compression test; ③ Concerning the liquefaction strength of sand, Results of analysis using parameters determined from the isotropic compression test and triaxial CD test showed agreement, on the whole, with results of the liquefaction test.

概 要

この報告は現在までに実施してきた砂およびレキの液状化に関する研究の内、以下に示す二つの研究成果についてまとめたものである。まず第一に粒径の異なる4種の砂およびレキを用いて中型繰返し三軸試験装置による液状化試験と動的変形試験を行い液状化強度や変形係数に及ぼす粒径の影響について検討した。第二に細砂を用いて繰返し中空ねじりせん断試験装置による液状化試験を行い、当社開発の液状化解析プログラム「EFECT」に導入した有効応力法によるシミュレーション解析で検証した。

その結果、得られた主たる成果は以下の通りである。① 粒径が大きくなるほど液状化強度は増大するが、今回の試験に限れば、ある一定値に収束するようである。② 液状化強度と等方圧縮試験から得られる圧縮指数との間には一義的な関係がある。③ 静的な等方圧縮除荷試験、静的三軸CD試験から求めたパラメータを動的有効応力解析に用いることによって、細砂の液状化強度をシミュレートできることが明らかとなった。

1. はじめに

人工島や臨海埋立地の工事においては、砂質土や粘性土のみならずレキなど粒径の大きな材料まで含めて多種多様な材料が使われている。このようにして造成された埋立地盤の耐震性で最も重要な課題は地盤の液状化問題であるが、これらの材料のうち砂質土に関しては従来から数多くの研究がなされてきているにもかかわらず、粘性土やレキについてはいまだ不明な点が数多く残されているのが現状である。また、液状化の詳細予測として近年多用されるようになった有効応力法を用いた液状化解析にも残された課題はまだ多い。

今年(1995年)1月17日に発生した兵庫県南部地震においても、特に埋立地で従来は液状化の可能性が低いと思われていた細粒分やレキを多く含んだ土まで液状化し

て数多くの被害を引き起こしている。このような現状を考えると、液状化現象に関して土自身の物性から構造物を含む全体系のシミュレーション解析に至る広範囲な研究を進めていくことがより一層重要になったといえることができる。

この報告は現在までに実施してきた砂およびレキの液状化に関する研究の内、以下に示す二つの研究成果についてまとめたものである。まず第一に粒径の異なる4種の砂およびレキを用いて中型繰返し三軸試験装置による液状化試験と動的変形試験を行い液状化強度¹⁾や変形係数²⁾に及ぼす粒径の影響について検討した。第二に細砂を用いて繰返し中空ねじりせん断試験装置による液状化試験を行い、当社開発の液状化解析プログラム「EFECT」に導入した有効応力法によるシミュレーション解析で検証した。

2. 液状化特性に及ぼす粒径の影響

2.1 試験方法

用いた試料は粒径 19.0 mm 以下の砕石と川砂を混合したものであり、全体の粒径範囲は0.425～19.0 mmとなっている。その試料に対して均等係数 (U_c) を等しくすることを目標として、ふるいによる粒度調整を行い、図-1に示す粒径加積曲線を持つ4種類の試料を作製した。表-1に試料の物理的性質を示す。一連の試験は中型振動三軸試験装置を用いたため、供試体の寸法はφ10 cm, h20 cmである。供試体の作製はパイプレーターにより、モールドを通じて供試体側方から振動を与えることによって試料を締め、液状化試験では相対密度は50%に、動的変形試験では、50%と70%の2種類に調整した。いずれの場合においても完全飽和で試験を行うために、あらかじめ供試体には炭酸ガスを一定時間通気し空気と置換させた後、脱気水を通水させることによって十分に飽和させた。飽和の確認はB値を計測し、B値95%以上の供試体に対して試験を行った。液状化試験は圧密非排水条件での応力振幅一定試験であり、動的変形試験は圧密非排水条件で応力振幅を段階的に増加させていく、いわゆるステージ試験である。初期有効拘束圧は1.0 kgf/cm²の等方圧、加振は周波数0.5 Hzの正弦波である。試験データはサンプリング周波数20 Hzで収録した。ステージ試験結果の整理は、1ステージにつき11波載荷させ10波目のひずみと軸差応力を用いた。

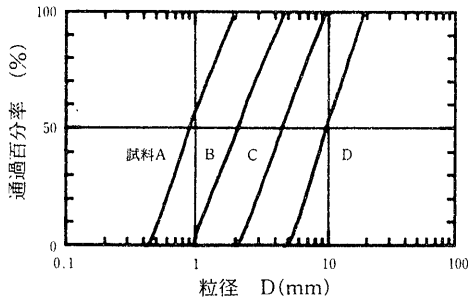


図-1 試料の粒径加積曲線

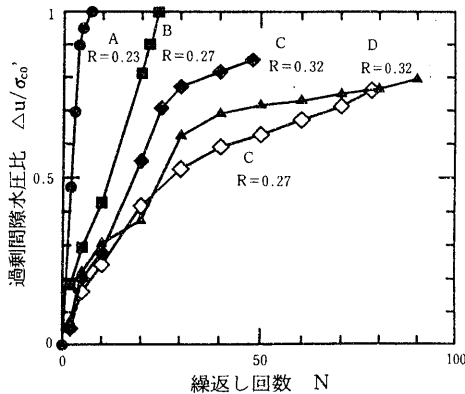


図-2 間隙水圧の上昇傾向

2.2 試験結果と考察

2.2.1 液状化試験 図-2は液状化試験中の過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_{c0}$) と繰返し回数 (N) との関係を示したものである。いずれの場合も過剰間隙水圧比は繰返し回数が増えるにつれて増加しているが、特に粒径の小さな試料 A, B は応力比が小さいにもかかわらず、急激に増加して最終的に $\Delta u/\sigma'_{c0}=1.0$ となって完全に液状化している。それに対して粒径が比較的大きな試料 C, D は応力比が大きいのにもかかわらず、過剰間隙水圧比の増加は小さく、最終的にも $\Delta u/\sigma'_{c0} < 1.0$ で有効応力が完全に消失してはいない。このことは、粒径が大きくなるほど液状化に対する抵抗力が大きくなることを示している。

表-1 試料の物理的性質

| 試料 | A | B | C | D |
|--|-------|-------|-------|-------|
| D ₅₀ (mm) | 0.9 | 2.1 | 4.5 | 9.6 |
| D _{max} (mm) | 2.0 | 4.75 | 9.5 | 19.0 |
| D _{min} (mm) | 0.425 | 0.85 | 2.0 | 4.75 |
| U _c | 2.02 | 2.18 | 2.08 | 1.86 |
| ρ _{dmax} (g/cm ³) | 1.637 | 1.605 | 1.759 | 1.647 |
| ρ _{dmin} (g/cm ³) | 1.342 | 1.389 | 1.398 | 1.428 |
| ρ _d (g/cm ³) | 1.475 | 1.489 | 1.558 | 1.530 |
| e ₀ (g/cm ³) | 0.812 | 0.794 | 0.715 | 0.746 |

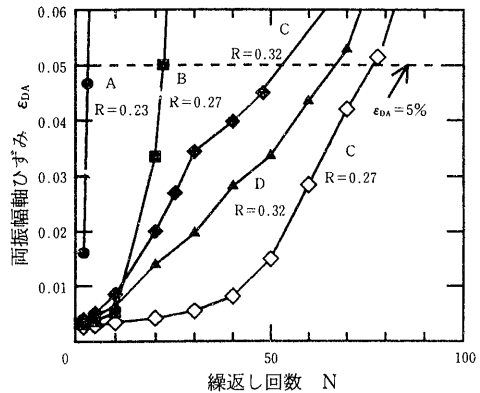


図-3 ひずみの上昇傾向

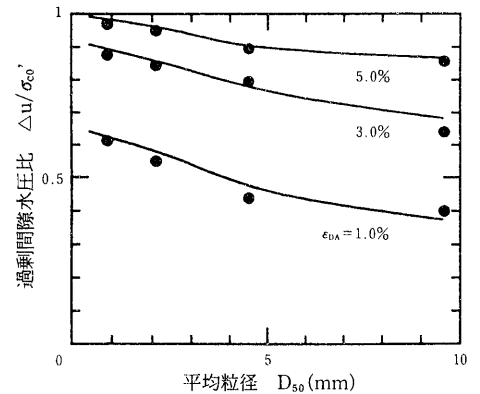


図-4 各ひずみレベルにおける過剰間隙水圧

通常、室内液状化試験における液状化の判定は $\Delta u/\sigma_{v0}'=1.0$ で行うことが多いが、これ以外にもひずみで判定することもある。図-3は液状化試験中の両振幅軸ひずみ (ϵ_{DA}) と繰返し回数との関係を示したものである。繰返し回数が増えるにつれてひずみは増大しているが、このような場合のひずみによる液状化の判定として $\epsilon_{DA}=5\%$ が用いられることが多い。これは、ひずみが5%も発生すれば、実際の地盤では当然液状化したとみなすことができるからである。

液状化試験中のひずみと過剰間隙水圧比の関係を試料の平均粒径 (D_{50}) ごとに整理したのが図-4である。ここで示した過剰間隙水圧比はそれぞれの試料で実施した応力比の異なる3~4ケースの液状化試験結果の平均である。 $\epsilon_{DA}=5\%$ の液状化時においては平均粒径の値にかかわらず、いずれの場合も過剰間隙水圧比はほぼ一定値を示しているが、ひずみが小さい範囲では、間隙水圧の上昇の割合は平均粒径が大きくなるほど遅れていることがわかる。これらは、粒径が大きいものほど1波当たりのひずみの増分が小さいことに起因していると考えられる。

図-5に両振幅軸ひずみが5%に達した時の応力比 (R) と繰返し回数との関係を示す。これは、それぞれの試料が液状化に対してどの程度の抵抗力を保有しているかをまとめたものであり、一般に液状化強度曲線と呼ばれている。図中で、平均粒径の大きな試料ほどこの曲線

が上方に位置しているが、それだけ液状化強度が大きいということを示している。ただし、実際の地震を想定すると繰返し回数がそれほど多くなるわけではないので、通常は繰返し回数20波に相当する応力比をこれらの曲線から求めて、その値を液状化強度 (R_{20}) と定義している。

こうして求めた液状化強度と平均粒径の関係を示したのが図-6である。前記の通り平均粒径が大きくなるにしたがい液状化強度の値も大きくなっているが、その値は $D_{50}=4.5\text{ mm}$ と 9.6 mm とでは、ほぼ一定値となり、粒径の影響はなくなることがわかる。

この現象を検討するために中型三軸試験装置を用いた静的な等方圧密試験を行った。図-7に等方圧密試験における圧縮指数 (Cc) と平均粒径の関係を示す。平均粒径が大きくなるほど圧縮指数の値は小さくなっているが、 $D_{50}=4.5\text{ mm}$ と 9.6 mm ではほぼ一定値となっている。これは今回の試験では各試料の相対密度を50%に統一したため、同一の相対密度では平均粒径が大きくなるほど初期間隙比が小さくなりその結果、体積変化が生じにくくなったからである。また $D_{50}=4.5\text{ mm}$ と 9.6 mm で、圧縮指数に差がほとんどみられないことは、図-6の試験結果で液状化強度の値が平均粒径が大きくなるにつれて一定値の傾向を示していることと関連している。

そこで、図-8に液状化強度と圧縮指数の関係を示すが、液状化強度は圧縮指数が大きくなるにつれてほぼ直

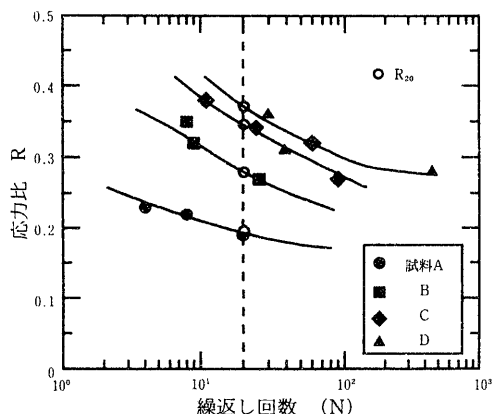


図-5 液状化強度曲線

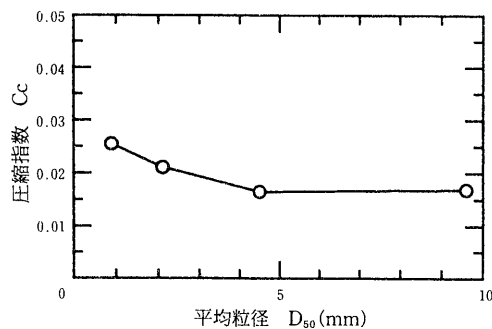


図-7 粒径が圧縮指数に及ぼす影響

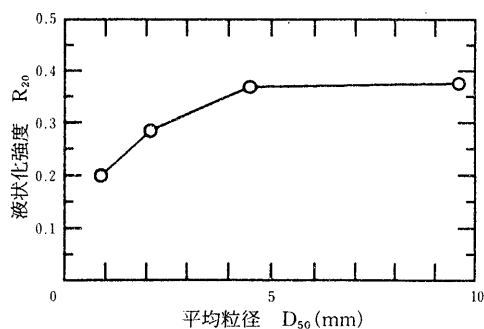


図-6 粒径が液状化強度に及ぼす影響

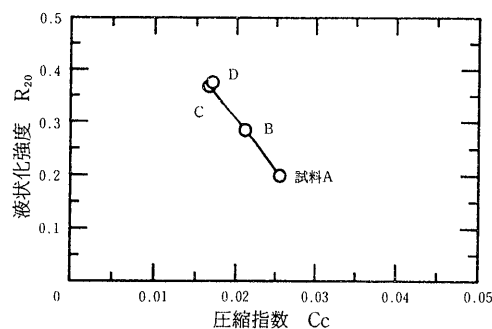


図-8 液状化強度と圧縮指数の関係

線的に小さくなっていることが明らかである。すなわち、体積変化が生じやすい（言い方を換えれば圧縮指数が大きい）土ほど液状化しやすいということが出来る。このことはゆるい砂地盤ほど液状化しやすいということとも対応している。ただし、今回用いた試料 A～D は同一の碎石を粒度調整したものであり、粒子の形状はいずれの試料についても同じで角ばったものである。また圧縮指数は粒径加積曲線が一致していても粒子の形状に影響を受けるパラメータであることから、この関係は粒子の形状ごとにユニークに決まるものと考えられる。

前述のように、液状化現象は過剰間隙水圧の上昇と、ひずみの増大ということで整理できるが、これらをまとめて過剰間隙水圧比とヤング率の低下との関係で示したのが図-9 である。ヤング率の低下としては、初期ヤング率で正規化した剛性比 (E/E_0) で示している。バラツキはあるものの、いずれの結果も粒径や応力比によらずほぼ同一の傾向を示していることが明らかである。このことは液状化中の剛性の低下は間隙水圧の上昇すなわち有効応力の低下に大きく依存していることを表している。今後、液状化の詳細な予測法として有効応力法を用いた解析がより重要になってくると思われるが、その際には過剰間隙水圧の上昇をいかに精度よく予測できるかが最も重要なポイントであることが、これらの試験結果からも明らかである。

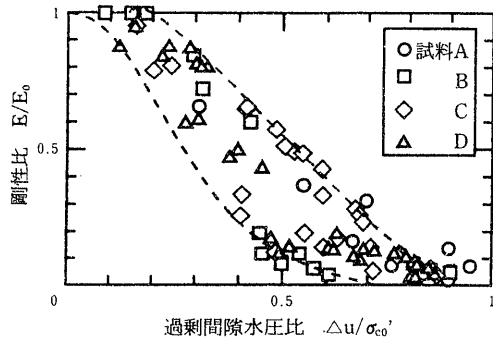


図-9 間隙水圧の上昇によるヤング率の低下

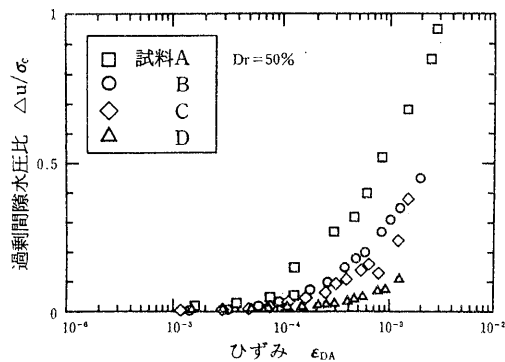


図-11 動的変形試験における間隙水圧の発生

2.2.2 動的変形試験 図-10(a),(b)に試験結果の1例として試料 A, D の場合におけるステージ試験結果を示す。図中には試験結果とともに Hardin-Drnevich モデルで近似した理論曲線を併せて示している。図より、密度の影響はひずみの小さいうちにはあるが、ひずみが大きくなると少なくなっていることがわかる。

また図-11に相対密度50%の供試体における各ステップごとの繰返し載荷終了時の過剰間隙水圧比とひずみの関係を示すが、ひずみが 10^{-4} 以下ではどのケースにおいても水圧がゼロであり、この範囲では弾性的性質が卓越していると考えられる。しかしながら、ひずみが大きくなるとかなり大きな過剰間隙水圧が発生しており、液状化だけでなく動的変形特性を考える際にも過剰間隙水圧の影響を十分に配慮した検討を行っておかなければならないことが明らかである。

3. 室内液状化試験のシミュレーション解析

3.1 試験および解析方法

本章では、細砂を用いた室内液状化試験を行い、有効応力解析プログラムを用いて、そのシミュレーション解析を行った。試験は中空ねじりせん断試験装置を用いて行い、プログラムの構成則は松岡らによる C. M. P 理論³⁾を導入した。

試験に用いた試料は岐阜砂で、比較的粒径のそろった

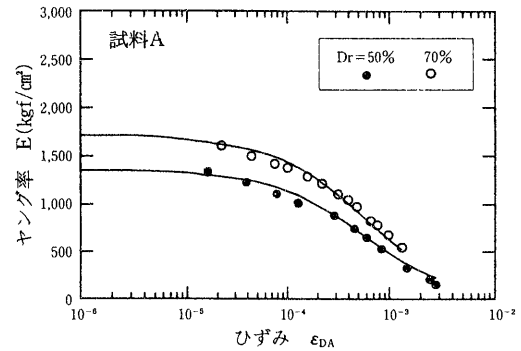


図-10 (a) 動的変形試験結果 (試料 A)

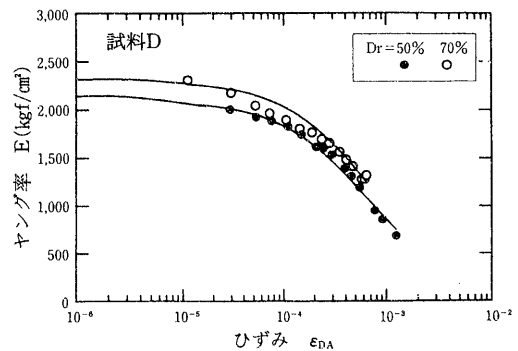


図-10 (b) 動的変形試験結果 (試料 D)

細砂である。供試体は空中落下法により作成し、圧密後の相対密度が50%となるように調節した。試験時の拘束圧は1 kgf/cm²、載荷周波数は0.1 Hzである。解析に用いたパラメータを表-2に示すが、これらはすべて三軸圧縮試験 (CD 試験) および等方圧縮・除荷試験 (CD 試験) によって求めた定数である。ただし、繰返し載荷時の有効応力経路を実現現象に近づけるために、応力反転ごとにダイレイタンシーパラメータ λ, μ に、ある一定の低減係数を乗じている。

ここで、解析に用いるパラメータの決定手法について簡単に説明する。松岡モデルによるストレス-ダイレイタンシー関係は次のように表される。

$$(\tau/\sigma_N) = \lambda(-d\varepsilon_N/d\gamma) + \mu$$

ここで、 σ_N 、 ε_N 滑動面上の応力、ひずみ

λ, μ ダイレイタンシーパラメータ

図-12に三軸圧縮試験より求めたストレス-ダイレイタンシー関係を示す。この関係を用いてダイレイタンシーパラメータ λ, μ を求めることができる。

硬化係数 k_s は、試験による $(\varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p) - \sin\phi_{m0}$ 関係を理論曲線によって近似することにより求めた。松岡モデルにおいて、硬化係数 k_s は塑性ひずみのせん断成分の大きさを決定するパラメータで、次のように表される。

$$d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p = k_s \frac{\sin^2\phi_f}{(\sin\phi_f - \sin\phi_{m0})^2} d(\sin\phi_{m0})$$

ここで、 ϕ_{m0} 滑動面上の摩擦角

図-13に今回得られた試験結果と理論曲線を示す。この関係より k_s の決定を行うことができる。

3.2 結果および考察

図-14, 15に液状化試験で得られた有効応力経路とシミュレーション解析結果を示す。図-14は応力比0.23、図-15は応力比0.20のケースである。いずれの解析結果も、せん断応力が繰返されるたびに過剰間隙水圧が発生して、平均有効応力が徐々に低下していくという液状化現象をよく再現している。特に応力比0.23のケースでは、液状化に至るまでの繰返し回数や、変相後のサイクリックモビリティの挙動もほぼ的確に表現している。これに対して応力比0.20のケースでは解析結果の方が実際の試

験よりも平均有効応力の低下速度が早く (過剰間隙水圧の発生量が大きい)ため、結果としてより少ない繰返し回数で液状化に達してしまっている。これについては、ダイレイタンシーパラメータの低減係数の設定法も含めて今後検討していく必要がある。

図-16に液状化強度曲線を示すが、試験で得られた液状化強度と比べて、解析による液状化強度曲線はやや右下がり勾配が急なものとなっている。これは、図-15でも明らかのように、応力比が小さい範囲では解析の方が試験よりも液状化に至る繰返し回数が少なくなるためである。ただし、液状化強度 (R_{20}) についてはおおむね試験と解析で一致している。

4. おわりに

この報告は、前半部分では中型繰返し三軸試験装置を用いて液状化試験と動的変形試験を行い、液状化強度や変形係数に及ぼす粒径の影響について調べた。また、後半部分では中空ねじりせん断試験装置による細砂の液状化試験結果について有効応力法を用いてシミュレーション解析を行い、要素試験と解析との整合性について検証した。その結果、以下の結論を得た。

- ① 粒径が大きくなるほど液状化強度は増大するが、今回の試験に限れば、ある一定値に収束するようである。
- ② 液状化強度 (R_{20}) と等方圧縮試験から得られる圧縮指数 (C_c) の間には一義的な関係がある。
- ③ レキにおいて、過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma_{c0}'$) と剛性比 (E/E_0) の間には粒径、応力比によらない関係がある。このことは剛性の低下は間隙水圧の上昇に大きく依

表-2 解析に用いたパラメータ一覧

| | | |
|---------------|-----------|-------------------------|
| ヤング率 | E | 461 kgf/cm ² |
| 間隙比 | e | 0.95 |
| 内部摩擦角 | ϕ | 38° |
| ポアソン比 | ν | 0.3 |
| 圧縮係数 | C_c | 0.017 |
| 除荷指数 | C_s | 0.010 |
| 硬化係数 | k_s | 0.0014 |
| ダイレイタンシーパラメータ | λ | 1.07 |
| | μ | 0.25 |

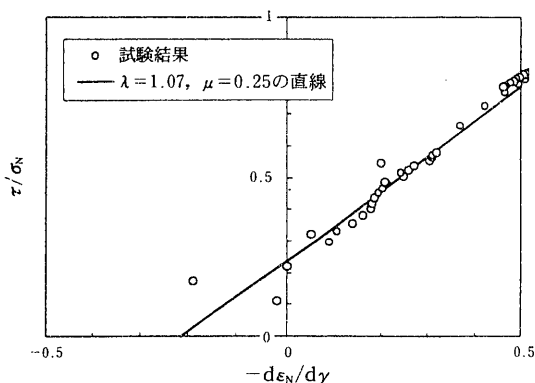


図-12 ストレス-ダイレイタンシー関係

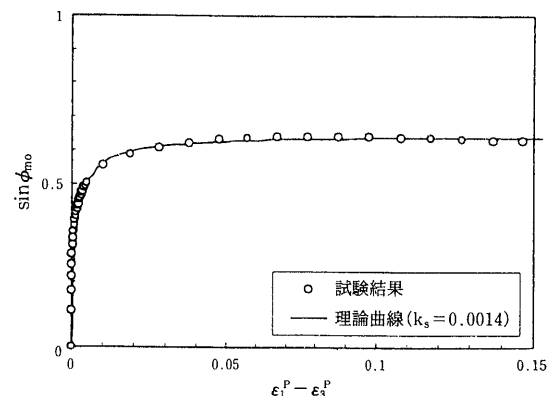


図-13 $(\varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p) \sim \sin\phi_{m0}$ 関係

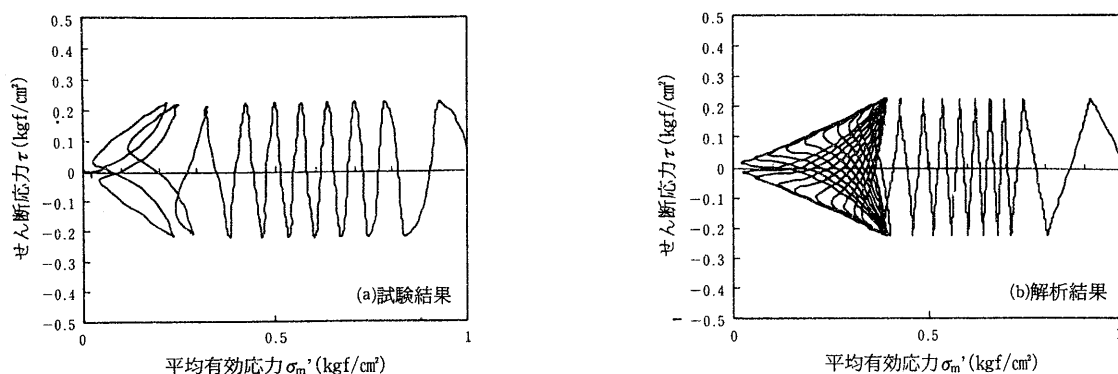


図-14 試験および解析による有効応力経路 (R=0.23)

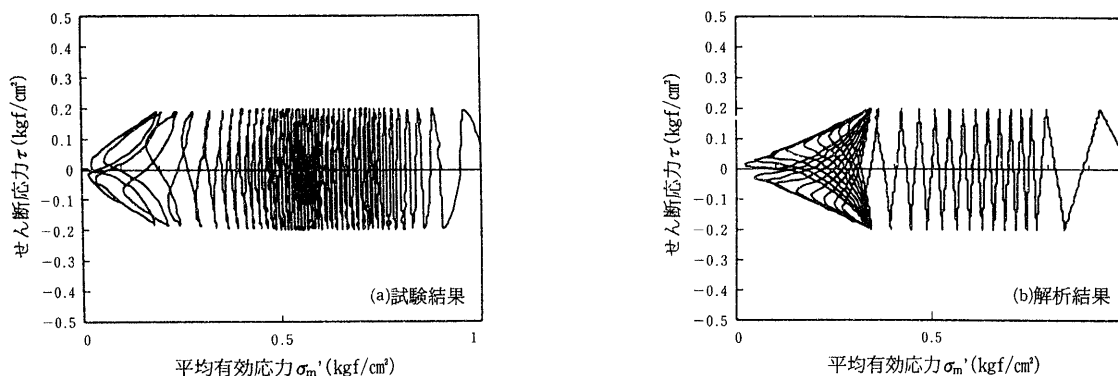


図-15 試験および解析による有効応力経路 (R=0.20)

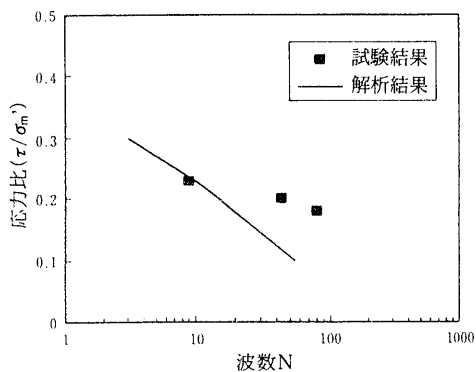


図-16 試験および解析による液状化強度曲線

存していることを示している。

④ 静的な等方圧縮除荷試験，三軸 CD 試験から求め

たパラメータを動的有効応力解析に用いることによって、細砂の液状化をシミュレートすることができる。

参考文献

- 1) 浜野，鳥井原，平間：液状化強度におよぼす粒径の影響について，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，p. 478～479，(1993)
- 2) 浜野，鳥井原，平間：微小ひずみ計を用いた異なる粒径を持つレキの変形特性について，第30回土質工学研究発表会講演集，(1995)
- 3) H. Matsuoka, K. Sakakibara: A Constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation: sold and foundation Vol. 27, No. 4, p. 73～88, (1987)