

液状化過程における砂の体積弾性係数の拘束圧依存性

権 永哲¹・浅野隆司²・仙頭紀明³・渦岡良介⁴・風間基樹⁵

¹東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06）

E-mail:kwon@soil1.civil.tohoku.ac.jp

²東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程（同上）

E-mail:asano@soil1.civil.tohoku.ac.jp

³東北大学大学院工学研究科土木工学専攻助手（同上）

E-mail:nsentoh@civil.tohoku.ac.jp

⁴東北大学大学院工学研究科土木工学専攻講師（同上）

E-mail:uzuoka@civil.tohoku.ac.jp

⁵東北大学大学院工学研究科土木工学専攻教授（同上）

E-mail:m-kazama@civil.tohoku.ac.jp

液状化解析で用いられる弾塑性構成式において、体積弾性係数は非排水条件下におけるダイレイタンスーに伴う有効応力の変化量を左右する重要な量である。しかしながら、液状化過程における砂質土の体積弾性係数については、拘束圧依存性などの特性が明らかになっていない。本研究では中空ねじりせん断試験装置と間隙水流量制御装置を用いて、豊浦砂の液状化過程における体積弾性係数を直接測定した。その結果、体積弾性係数は100kPaの初期拘束圧からほぼ0の拘束圧の範囲において、平均有効応力の0.7乗程度に比例していること、また、その関係は供試体作成方法や繰返しせん断履歴によらないことを明らかにした。

Key Words : bulk modulus, liquefaction, hollow cylindrical torsional shear test, elasto-plastic constitutive model

1. はじめに

液状化現象のシミュレーションに用いられる有効応力解析では、体積弾性係数 K は間隙水圧上昇特性を規定する重要なパラメータの一つである。従来、体積弾性係数は構成式により異なる手法で評価されてきた。その代表例としては、粘土を対象とした膨潤指数を用いて体積弾性係数を規定する方法、砂を対象としたせん断弾性係数 G とポアソン比から体積弾性係数を規定する方法などが挙げられる。しかしながら、繰返しせん断を伴う液状化過程における体積弾性係数に関して、このような考え方の適用に対する実験的根拠はこれまで示されていなかった。

繰返しせん断を受ける前の状態（初期状態）および液状化過程における砂のせん断あるいは体積弾性係数に関する既往の研究を概観する。まず、せん断弾性係数に関して、初期状態については数多くの研究がなされており、例えば初期間隙比と平均有効応力の関係¹⁾などが整理されている。液状化過程においてせん断弾性係数を測定した事例はさほど多くないが、例えば河上ら²⁾の研究がある。一方、体積弾性係数に限らず、砂の体積変形特性に

関する研究は、粘土と比較して非常に少ない。砂の場合、粒子破砕が問題となるような高い拘束圧下でなければ、体積変化は小さいことから、工学的に問題とならないため、研究例が少ないものと思われる。初期状態の砂に対する体積弾性係数の測定例として、豊浦砂を対象とした Pradhan らの研究³⁾ や不攪乱試料を対象とした酒匂ら⁴⁾の研究がある。これらの研究は、有効応力解析で使用される繰返し弾塑性構成式の体積弾性係数の初期値を設定する上で貴重なデータとなっている。また、液状化中あるいは、液状化後の再圧密の過程における体積圧縮係数を実験的に究明しようとする研究が行われている⁵⁾・⁶⁾。しかしながら、液状化過程における体積弾性係数に着目した研究はほとんどなく、先に述べたように砂の弾塑性構成式の定式化は経験的な仮定に基づいている。そこで、本研究では中空ねじりせん断試験装置と間隙水流量制御装置を用いて、繰返しせん断履歴作用下における豊浦砂の体積弾性係数を直接測定する。あわせて、体積弾性係数の有効拘束圧依存性に対する供試体の作成方法と繰返しせん断履歴の影響を検討する。また、最後に実験で測定した体積弾性係数をパラメータとした繰返し弾塑性構成式を用いて、液状化試験のシミュレーション

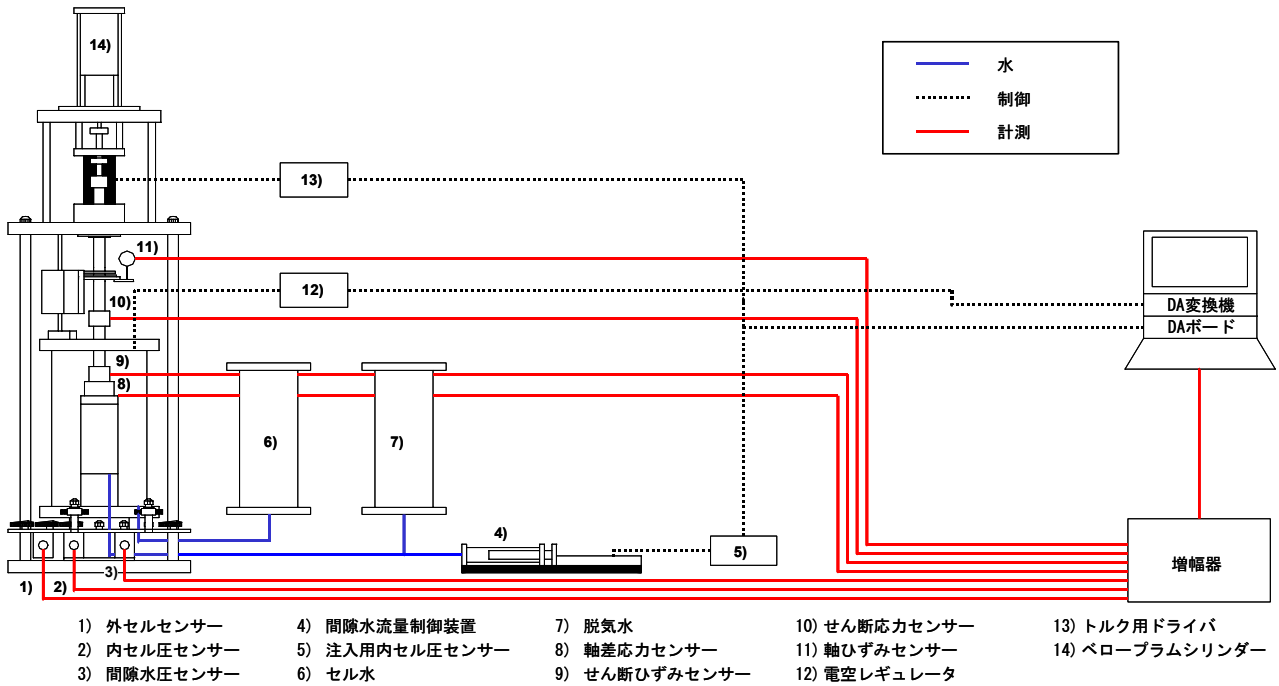


図-1 室内実験装置の概略図

を実施し、体積弾性係数の有効拘束圧依存性が構成式の挙動に与える影響を考察する。

2. 体積弾性係数測定実験の概要

液状化過程での体積弾性係数の有効拘束圧依存性に関する検討のために中空ねじり試験と間隙水流量制御装置を用いて室内実験を行った。

(1) 実験装置

室内実験装置の概略図を図-1に示す。実験装置は主に中空ねじりせん断試験装置と間隙水流量制御装置で構成されている。

特に本研究では、液状化過程における体積弾性係数の変化を究明するためには繰返しせん断過程中に供試体に微小な体積ひずみを発生させる必要がある。そのために開発したものが間隙水流量制御装置である。この装置は供試体内に間隙水を注水または排水することによって微小体積ひずみの除荷・再載荷を行う。装置は間隙水セル室、精密位置テーブル、ピストン、ステッピングモーターにより構成され、ステッピングモーターの回転運動によりピストンが前後に動くことで注水または排水を行っ

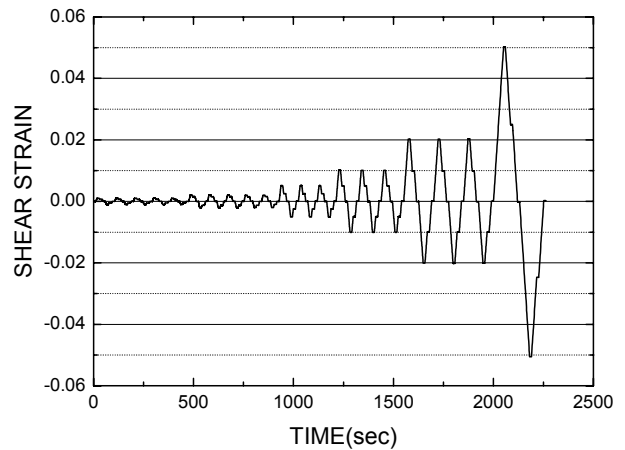


図-2 せん断ひずみ履歴

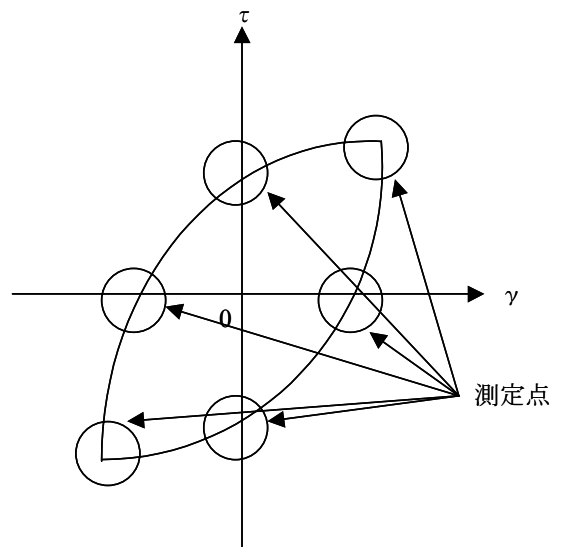


図-3 体積弾性係数の測定点

表-1 室内実験ケース

実験ケース	作成方法	相対密度	圧密後間隙比
1	a	65%	0.727
	b	64%	0.728
2	a	64%	0.731
	b	62%	0.735

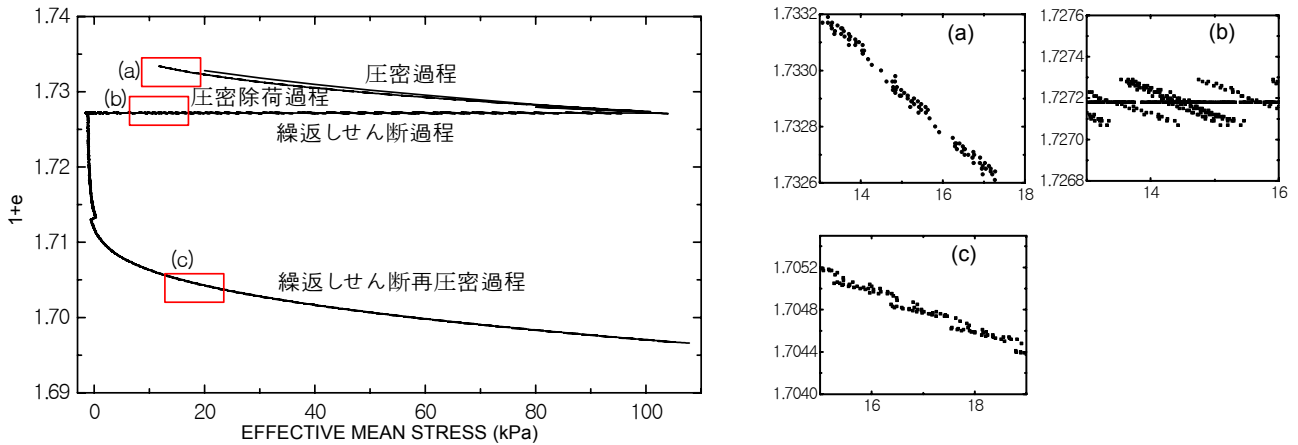


図-4 実験過程の比体積と平均有効応力の関係

ている。本装置のピストンは直径 2cm, ストローク 22.5cm である。ステッピングモーターの分解能は $360^\circ/10000\text{pulse}$ であり、精密位置テーブルのリード長が 2mm である。このことから計算された流量の最小分解能は $6.3 \times 10^5 \text{cm}^3$ となっている。これによって非常に小さい体積ひずみの制御ができるようになり、液状化過程においての体積弾性係数の直接算定が可能となる。

(2) 室内実験ケース

室内実験ケースを表-1 に示す。初期有効拘束圧は 100kPa とし、载荷は非排水条件下でひずみ制御で行った。そのひずみ波形は図-2 に示すようにひずみ振幅漸増型の三角波とし、その振幅は片振幅で 0.1%(5 波), 0.2%(5 波), 0.5%(3 波), 1%(3 波), 2%(3 波), 5%(1 波)とした。また、再現性を確認するためにそれぞれのケースについて 2 回の実験を行なった。

(3) 試料及び供試体作成方法

本研究で用いた試料は豊浦砂である。試料の物性は比重 2.64, $e_{\max}=0.967$, $e_{\min}=0.596$, 平均粒径 $D_{50}=0.4\text{mm}$, 細粒分 0%である。中空ねじり室内試験の供試体寸法は、外径 10cm, 内径 6cm, 高さ 10cm の中空円筒である。供試体作成方法が弾性剛性におよぼす影響を検討するために、空中落下法または突き固め法を用いて供試体を作成した。空中落下法では目標相対密度を 65%とし、乾燥試料を 50cm の高さから落下させて作成した。突き固め法では目標相対密度を 65%とし、定量の乾燥試料を 3 層に分けてモールド内に入れ、層ごとに木製の棒を用いて 20 回ずつ突き固めて作成した。各実験ケースにおける、供試体の圧密後の相対密度および間隙比を表-1 にまとめた。

3. 室内実験方法

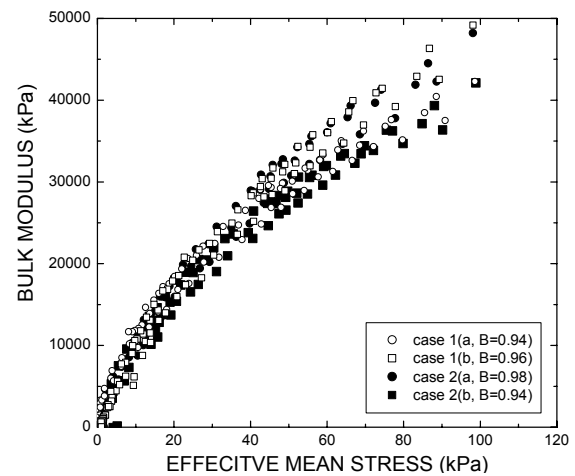


図-2 室内実験の再現性

空中落下法と突き固め法で作成した供試体を中空ねじり試験装置にセットして実験を実施した。20kPa の予備圧密後、 CO_2 、脱気水および 200kPa の背圧を载荷することで試料を飽和させた。

次に供試体下部を間隙水流量制御装置に接続した状態で、有効拘束圧 100kPa まで圧密する。この際、10kPa 上がるごとに排水量と軸ひずみを測定しておく。その後、等方圧密除荷過程—等方再圧密過程—繰返しせん断過程—繰返しせん断後再圧密過程の順に载荷・除荷過程を行う。本研究において、液状化過程、すなわち繰返しせん断過程の体積弾性係数が重要なターゲットであるが、液状化前後の体積弾性係数と比較・考察するために、液状化前の圧密除荷過程と繰返しせん断後再圧密過程においても体積弾性係数の算定を行うことにした。

なお、繰返しせん断過程における体積弾性係数の測定は図-2 に示すように载荷・除荷状態変化点、せん断ひずみがゼロになる点、せん断応力がゼロになる点の 6 点の特性点で行った。体積弾性係数は体積ひずみと平均有効応力の変化から式(1)によって算出する。

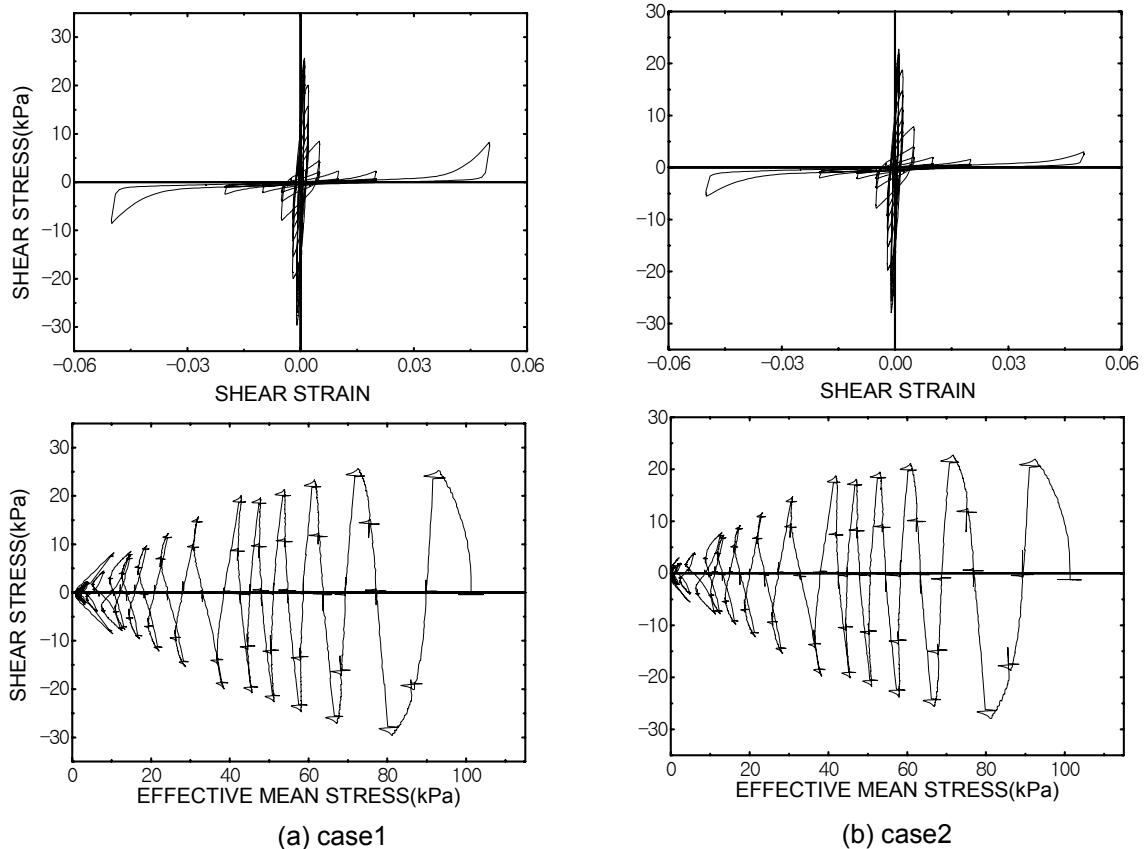


図-6 せん断応力-せん断ひずみ関係と有効応力経路

$$K[\text{kPa}] = \frac{\text{有効平均応力の減少量}[\text{kPa}]}{\text{体積ひずみの増加量}} \quad (1)$$

各過程における試験方法は以下ようになる。

(1) 圧密除荷過程

図-4 に示すように間隙水流量制御装置を用いて、ひずみ速度 0.05%/min で間隙水を注入することで、有効拘束圧が 10kPa まで等方圧密除荷を行なう。その過程で図-4 拡大図(a) に示す比体積と平均有効応力の関係から体積弾性係数を算定する。その後、等方圧密再載荷を行ない、有効拘束圧 100kPa の状態まで戻す。

(2) 繰返しせん断過程

図-2 に示した繰返しせん断履歴を与え、繰返しせん断中に体積弾性係数を求めるための微小除荷・再載荷を行なう。繰返しせん断中に間隙水流量制御装置を用いて、図-4 拡大図(b) に示すように体積ひずみ片振幅 0.0063% をひずみ速度 0.6%/min で除荷・再載荷することによって体積弾性係数を比体積と平均有効応力の関係から算定する。なお、除荷・再載荷を行うとき、砂の透水係数が粘土等と較べて十分大きいので、時間依存性挙動と供試体中の応力や変形の不均一は生じていないものと考えた。

(3) 繰返しせん断後再圧密過程

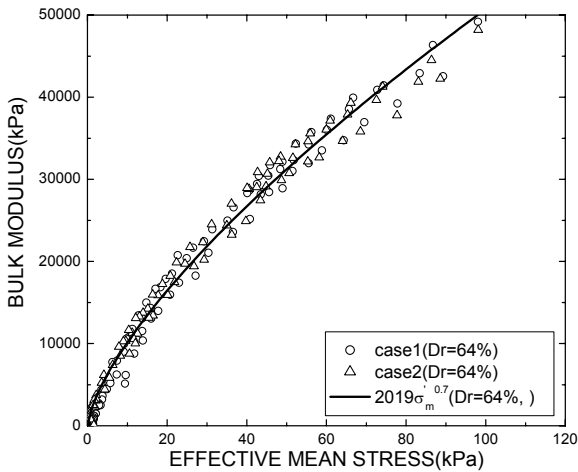
繰返しせん断試験が終了した後、間隙水流量制御装置を用いて、有効有効応力が 100kPa に至るまで、体積ひずみ速度 0.05%/min で再圧密を行なう。繰返しせん断後再圧密中、図-4 拡大図(c) に示すように(2)と同様に体積弾性係数の測定を行なう。

4. 室内実験結果と考察

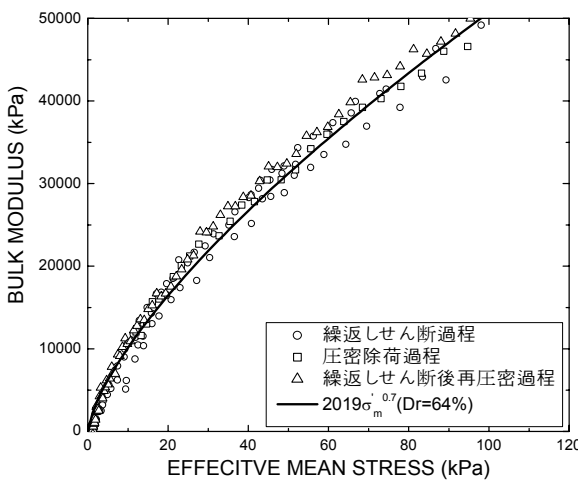
図-5 に室内実験の再現性を確認するためにケース 1 と 2 の繰返しせん断過程の体積弾性係数-平均有効応力の関係を示した。各ケースにおける a, b 間でばらつきがみられるのは B 値の違いと供試体の製作過程の実験誤差の影響であると考えられる。このように体積弾性係数の絶対値にはややばらつきがあるが、研究で対象としている拘束圧依存特性のばらつきは小さいと考えて実験の再現性は確保されていると判断した。以下では各ケースで B 値が高い方(ケース 1b, ケース 2a)を対象として議論することとする。

(1) せん断応力-せん断ひずみ関係

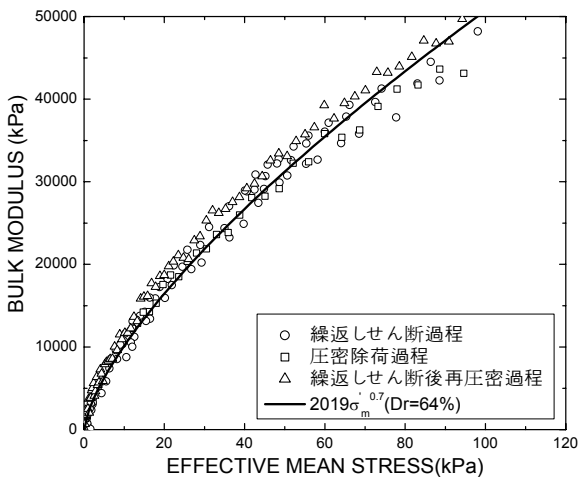
図-6 上に各ケースのせん断応力-せん断ひずみ関係



(a) 供試体作成方法の違い (繰返しせん断過程)



(b) 圧密過程と液状化過程での比較(case1)



(c) 圧密過程と液状化過程での比較(case2)

図-7 体積弾性係数の比較

及び有効応力経路を示す。繰返しせん断履歴が増えると、せん断剛性が徐々に低下していくのがわかる。いずれのケースでもせん断応力が回復するサイクリックモビリティ現象が現われる。

(2) 有効応力経路

各ケースの有効応力経路を図-6 下に示す。図中、平均有効応力の微小な増減が確認でき、この点が体積弾性係数の測定点である。いずれのケースでもせん断ひずみ5%のピーク時にサイクリックモビリティによる有効応力の回復がみられる。

(3) 体積弾性係数

室内実験で得られた体積弾性係数を実験パラメータである供試体作成方法と繰返しせん断履歴について整理し、比較検討を行った。

まず、供試体の作成方法を変えることで、砂の初期構造を変化させた場合の体積弾性係数の変化について考察する。図-7(a)にケース1, 2の繰返しせん断過程における体積弾性係数と平均有効応力の関係を示す。突き固め法と空中落下法では砂のせん断変形特性が大きく変化するという指摘がある⁷⁾。図-7(a)からわかるように、空中落下法の場合と突き固め法の場合では、体積弾性係数の値はほぼ同じ傾向にある。このことより、空中落下法と突き固め法に関しては、供試体の初期構造が体積弾性係数に与える影響はほとんどないといえる。また、体積弾性係数の拘束圧依存関係に着目すると、ケース1, 2はどちらも図中に示した近似曲線によるフィッティングから、体積弾性係数は平均有効応力の0.7乗にほぼ比例した関係があるものと考えられる。図-7(a)に示した実線の体積弾性係数と平均有効応力の関係は以下のようになる。

$$K = 2019 \times (\sigma_m')^{0.7} \quad [\text{kPa}] \quad (\text{Dr}=64\%) \quad (2)$$

ここで、 σ_m' は平均有効応力である。

図-7(b)にケース1の圧密除荷過程、繰返しせん断過程及び繰返しせん断後再圧密過程の3つにおける体積弾性係数と平均有効応力の関係を示す。図-7(b)でわかるように圧密除荷過程と繰返しせん断過程の体積弾性係数は同様の傾向を示している。このことから、膨潤過程における体積弾性係数と繰返しせん断による液状化過程における体積弾性係数はほぼ同じであると考えられる。これは、圧密除荷過程における密度の変化が図-4に示すように大きくないためと考えられる。

また、繰返しせん断後再圧密過程における体積弾性係数は、その他の過程の体積弾性係数よりわずかに大きい。これは、液状化後の排水により図-4に示すような大きい体積変化が生じ、再圧密過程では供試体が密になるためだと考えられる。

図-7(c)はケース2の圧密除荷過程、繰返しせん断過

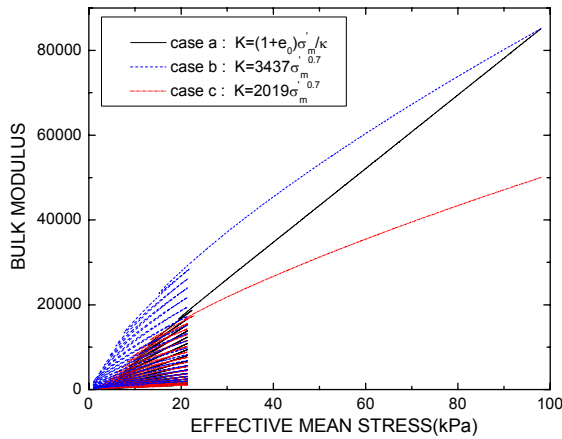


図-8 体積弾性係数の拘束圧依存性

表-2 地盤材料パラメータ

初期間隙比	e_0	0.737
圧縮指数	λ	0.020
膨潤指数	κ	0.002
初期せん断係数比	G_0/σ_m^i	1063.98
破壊応力比	M_f^*	1.30
変相応力比	M_m^*	0.91
硬化関数中のパラメータ	B_0^*	5000.0
硬化関数中のパラメータ	B_1^*	50.0
ダイレイタンスー係数	D_0^*	2.0
ダイレイタンスー係数	n	3.0
基準ひずみ(塑性)	γ_r^{p*}	0.005
基準ひずみ(弾性)	γ_r^{E*}	0.020

程及び繰返しせん断後再圧密過程の3つにおける体積弾性係数と平均有効応力の関係を示しており、ケース1と同様の傾向が見られる。ここでも供試体作成方法も影響は小さいことがわかる。

5. 弾塑性構成式における体積弾性係数の評価

(1) 弾塑性構成式における体積弾性係数の取り扱い

従来、体積弾性係数は構成式によって異なる方法で評価されてきた。一つは主に粘土を対象とした構成式で用いられてもので、膨潤指数 κ を用いて体積弾性係数を規定する方法である。ここでは、等方圧密・膨潤試験における膨潤時の $e-\log\sigma_m^i$ 関係が直線になると仮定している。この場合、体積弾性係数は、式(3)のように、平均有効応力そのものに比例する。もう一つは主に砂を対象した構成式で用いられているもので、せん断弾性係数とポアソン比から式(4)で算定される。せん断弾性係数は平均有効応力の0.4乗程度に比例しているため¹⁾、体積

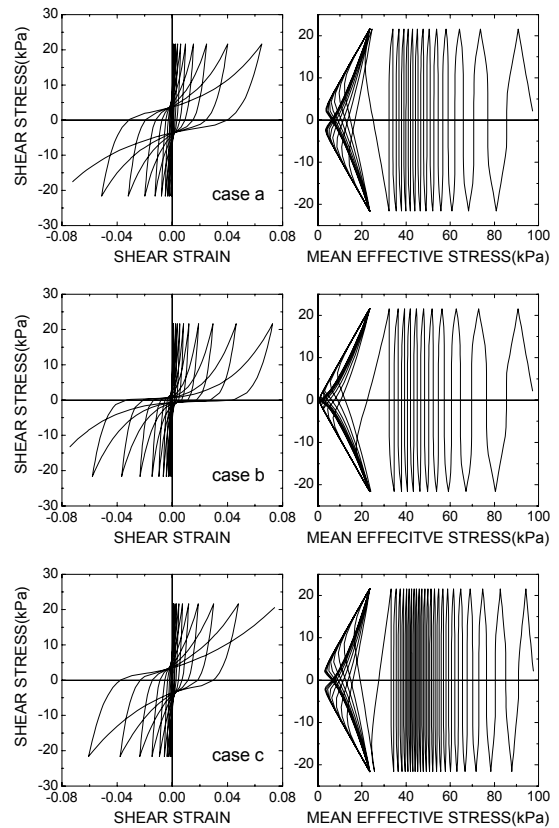


図-9 繰返し弾塑性構成式による応力-ひずみ関係と有効応力経路

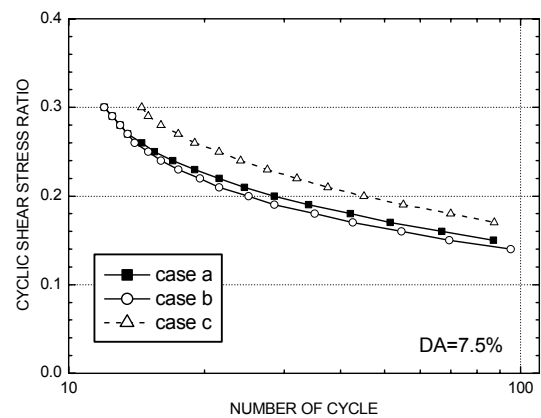


図-10 液状化強度曲線

弾性係数は平均有効応力の0.4乗程度に比例することになる。

$$K = \frac{1+e}{\kappa} \sigma_m^i \quad (3)$$

$$K = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G_{\max} = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} A \cdot f(e) \cdot \sigma_m^i{}^n \quad (4)$$

ここで、 e は間隙比、 κ は膨潤指数、 ν はポアソン比、 G_{\max} は最大せん断弾性係数、 A と n は材料定数である。液状化解析で用いられる構成式においては体積弾性

係数が重要な役割を持っているにも関わらず、このような2つのタイプの体積弾性係数が用いられる。これは、他のパラメータ（例えば、ダイレイタンシーパラメータなど）を調整することによって、室内試験で得られた砂の繰返し挙動を表現することができることが一因となっている⁸⁾。

一般的な弾塑性モデルにおける体積弾性係数の役割は以下ようになる。まず、液状化過程において非排水条件（骨格の体積不変）を仮定すると、

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p \quad (5)$$

ここで、 $d\varepsilon_v$ は体積ひずみ増分、 $d\varepsilon_v^e$ と $d\varepsilon_v^p$ はそれぞれ弾性体積ひずみ増分と塑性体積ひずみ増分である。また、ストレス-ダイレイタンシー関係より

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\gamma^p} = M_m - \frac{s}{\sigma_m'} \quad (6)$$

ここで、 $d\gamma^p (= \sqrt{e_{ij}^p \cdot e_{ij}^p} : e_{ij}^p$ は塑性偏差ひずみテンソル)は塑性せん断ひずみ、 M_m は変相応力比、 $s (= \sqrt{s_{ij} \cdot s_{ij}} : s_{ij}$ は偏差応力テンソル)は偏差応力である。平均有効応力増分と弾性体積ひずみ増分の関係に式(5)と(6)を代入すると、

$$d\sigma_m' = K d\varepsilon_v^e = -K d\varepsilon_v^p = -K \left(M_m - \frac{s}{\sigma_m'} \right) d\gamma^p \quad (7)$$

$$d\sigma_m' = -B (\sigma_m')^n \left(M_m - \frac{s}{\sigma_m'} \right) d\gamma^p \quad (8)$$

となる。ここで、 B は材料定数である。

非排水繰返しせん断過程において、体積弾性係数は式(7)からわかるように平均有効応力の変化に関するパラメータとなる。また、同じダイレイタンシー特性を持っていたとしても体積弾性係数の値が大きい場合が有効応力の減少量が大きくなる。つまり、式(7)において、体積弾性係数の影響だけを考えると、 $M_m > s/\sigma_m'$ の条件下での体積弾性係数が大きくなるほど液状化しやすい状態になる。

(2) 液状化試験のシミュレーション結果

先に示した室内実験結果から、体積弾性係数は有効拘束圧の0.7乗程度に比例していることがわかった。このように得られた体積弾性係数の拘束圧依存性が繰返し弾

塑性構成式の挙動に与える影響を調べるために砂の繰返し弾塑性モデル⁹⁾を用いて液状化試験のシミュレーションを行った。

解析では液状化過程における体積弾性係数の変化の影響を調べるために図-8に示すようにケースa：体積弾性係数が有効拘束圧の1乗に比例する場合（オリジナルモデル、式(3)を使用）、ケースb：体積弾性係数が有効拘束圧の0.7乗に比例するが初期状態($\sigma_{m0}' = 98\text{kPa}$)だけをケースaと一致させた場合 ($K = 3437\sigma_{m0}'^{0.7}$)、ケースc：室内実験結果をそのまま適用した場合（式(2)を使用）の3ケースを考えた。解析に用いた地盤材料パラメータを表-2に示す。オリジナルモデルにおけるこれらのパラメータはTatsuoka(1982)ら¹⁰⁾が中空ねじりせん断試験を用いて得た豊浦砂の液状化強度（等方圧密試料の両振幅7.5%のひずみ基準、相対密度65%）を基準にして設定したパラメータである。特に、ここで問題となる膨潤指数は豊浦砂に対する等方圧密膨潤試験から得られたものである³⁾。ここでの体積弾性係数の値は平均有効応力29.4kPa~98kPaの間の平均的な値を採用していることもあって、今回の実測したケースcより大きな体積弾性係数を与えている。

式(7)からもわかるように $M_m > s/\sigma_m'$ の条件下では体積弾性係数が大きくなると、平均有効応力減少量が大きくなり、砂のせん断剛性は小さくなる。図-9左は各ケースについて、繰返し弾塑性構成式で計算されたせん断応力-せん断ひずみ関係を示しており、体積弾性係数が一番大きいケースbから、このような傾向を確認することができる。図-10は各ケースにおける液状化強度曲線であり、体積弾性係数が小さいケースで液状化強度が大きく発現していることが確認できる。

ここで特に着目したい点は、ケースaとケースbの比較における、体積弾性係数の平均有効応力に対する変化の影響である。载荷初期には両者の差はほとんどないが、平均有効応力が30kPa未満となる点、すなわち、有効応力経路が変相線を越えたあたりから、両者の差が大きくなる。体積弾性係数と平均有効応力との間にべき乗の関係を用いたケースbでは、有効応力経路がより原点に近づき、平均有効応力が小さい時点がせん断応力が0に近いあたりに対応し、その分、せん断ひずみ振幅も大きくなる。ただし、図-10の液状化強度曲線は応力振幅一定下で所定のひずみに到達する回数を示したものに過ぎず、ケースaとケースbの違いはさほど大きくない。しかしながら、実際の構造物の有効応力解析においては、構造物の地震時変形量などに大きな違いが発生する可能性がある。このように、体積弾性係数の拘束圧依存特性は、平均有効応力が比較的小さくなる領域での弾塑性構成式の挙動に影響する。

6. まとめ

相対密度約 65%の豊浦砂を対象として液状化過程における体積弾性係数を測定した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 0~100kPa の有効拘束圧の範囲において、体積弾性係数は有効拘束圧の 0.7 乗程度に比例した。
- 2) この有効拘束圧と体積弾性係数の関係は突き固め法と空中落下法の二つの供試体作成方法によらない。
- 3) 静的な等方膨潤過程における体積弾性係数~有効拘束圧関係と繰返しせん断による液状化過程のそれはほぼ同じである。しかし、液状化後の排水再圧密過程における体積弾性係数は密度増加のため、やや大きな傾向を示した。
- 4) 実験で得られた平均有効応力と体積弾性係数の関係式を繰返し弾塑性構成式に適用した結果、平均有効応力が小さくなる領域でその関係式の違いによる影響が明確となった。

謝辞：本論文は、文部科学省が推進している大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行ったものである。ここに記して、関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) T. Iwasaki and F. Tatsuoka : Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 17, No. 3, pp. 19~35, 1977.
- 2) 河上定弘, 永山浩, 古関潤一, 佐藤剛司 : 液状化過程における豊浦砂微小変形特性, 第34回地盤工学研究発表会,

表会, pp.411~412, 1999.

- 3) Pradhan, B.S., Tatsuoka, F. and Sato, Y.: Experimental stress-dilatancy relations of sand subjected to cyclic loading, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.1, pp.45-64, 1989.
- 4) 酒匂教明, 畑中宗憲, 内田明彦, 田屋裕司 : 不攪乱砂質土の体積圧縮係数, 第34回地盤工学研究発表会, pp.395~396, 1999.
- 5) 上原精治, 三上 博, 高橋直樹, 山口隆史, 兵動正幸 : 排水を考慮した液状化時の砂の体積圧縮係数について (その2), 第33回地盤工学研究発表会, pp. 723 ~724, 1998.
- 6) 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介, 松谷明洋 : 体積比済みを制御した砂の再圧密試験, 第37回地盤工学研究発表会, pp. 1993~1994, 2002.
- 7) 吉嶺充俊, 唐沢里英, 細野康代 : 色々な方法で作成した砂の三軸供試体の非排水せん断時の異方性, 第36回地盤工学研究発表会, pp.411~412, 2001.
- 8) 吉田 望 : これからの動的解析 : 基礎・応用・問題点と事例, これからの数値解析講習会資料, 地盤工学会, pp. 33~64, 1998.
- 9) F. Oka, A. Yashima, A. Tateishi, Y. Taguchi and S. Yamashita : A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-stain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 49, No. 5, pp.661~680, 1999.
- 10) F. Tatsuoka, M. Muramatsu and T. Sasaki : Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 2, pp. 55~70, 1982.

(2003. 6. 30 受付)

CONFINING PRESSURE-DEPENDENCY OF BULK MODULUS OF SAND DURING LIQUEFACTION

Youngcheul KWON, Takashi ASANO, Noriaki SENTO, Ryosuke UZUOKA
and Motoki KAZAMA

In a elasto-plastic constitutive model, a bulk modulus is one of the most important parameters to control the change of an effective stress under undrained condition. However, the experimental research on bulk modulus of sand during liquefaction, was not conducted so far. In this paper, therefore, the bulk modulus of Toyoura sand was measured directly during liquefaction using a hollow cylindrical torsional shear testing device and a volume strain control device. It is founded from this study that the bulk modulus is proportional to the 0.7th power of the effective confining pressure, and that the relationship is not affected by the specimen preparation method and the strain history.