

高圧下におけるメタンハイドレート固結砂の
平面ひずみせん断挙動と局所化の評価Evaluation of Local Strain and Shear Behavior of Methane Hydrate-bearing Sand
under High Pressure during Plane Strain Test

今村豊	Yutaka IMAMURA	(山口大学大学院理工学研究科)
米田純	Jun YONEDA	(山口大学大学院理工学研究科)
兵動正幸	Masayuki HYODO	(山口大学大学院理工学研究科)
中田幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院理工学研究科)
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院理工学研究科)

次世代資源として考えられているメタンハイドレート(Methane Hydrate:以下MHと略す)の生産時に、MHの分解により地盤強度の低下や変形が生じ、生産井の安定性の低下や海底地すべりの発生が懸念されている。実地盤におけるMHの生成は不均一であることや生産時の地盤の変形は分解フロントから局所的に発生すること、MHのような固結力を有する土は変形の局所化が顕著に起こりやすいことが考えられ、局所変形を把握することが重要である。そこでMH固結砂の局所変形の観察が可能な恒温高圧平面ひずみ試験装置を開発し、マクロな応力及びひずみ挙動と同時に、実験中に取得した画像によりせん断時の局所変形を調べ、せん断帯外では供試体全体と同様な収縮傾向を示す一方、せん断帯内ではせん断帯の形成に伴い体積膨張が顕著に起こることが確認された。

キーワード：メタンハイドレート、局所変形、セメンテーション、平面ひずみ、高圧、深海底 (IGC : D06)

1. はじめに

現在、経済成長や人口増加に伴って、世界のエネルギー消費量は増え続けている。我が国においても、エネルギー消費量は年々増加している。エネルギー資源の多くを外国に依存している我が国にとって、エネルギー資源の確保は国の重要課題のひとつとなっている。このようなエネルギー事情を反映し、次世代エネルギー資源としてメタンハイドレート(Methane Hydrate:以下MHと略す)が注目を浴びている。MHは水分子から成る籠状の結晶構造の内部にゲスト分子としてメタンが入り込んだ水和物で、低温高圧下で氷状の結晶として安定して存在する。MHの相平衡条件はKatzら¹⁾によって求められ、Kvenvolden²⁾は深海底地盤の代表的な深度-温度関係と深海底における存在領域を示した。その図を図-1に示す。図の斜線部が、実際にMHが存在していると考えられる領域である。

日本では、MH資源開発に関する研究は1995年から始まった。1996年には南海トラフ等の海域において海上地震探査を行いMH賦存の可能性が調査された。その結果、推定資源量は7.35兆 m^3 とされており³⁾、2003年度における日本が使用した天然ガスの約100年分となる。さらに、2008年には東部南海トラフだけで巨大ガス田クラスのガス埋蔵量(約1.1兆 m^3)の存在が確認されている。このようにMHは日本の近海に大量に存在している。このため、MHの開発を目的としたメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムが2002年に設立され、現在も研究開発

が積極的に行われてきている⁴⁾。

実地盤におけるMHの存在形態は様々である。泥質土層の中や海底面に塊として存在するもの、砂質土層の間隙内を埋める形で存在するものがある。東海沖～熊野灘で行われた基礎試験結果から、深海底地盤中にあるMH濃集層は、タービダイト層と呼ばれる砂質土層と粘性土層が交互に存在する地層となっている事が知られている。そのMH濃集層において、MHは砂泥互層の砂質土層中の間隙を充填するように存在していることが明らかにされている⁵⁾。このように砂質土の間隙を充填する形で存在するものに関しては、その中に含まれるMHの量によって地盤の力学特性が大きく異なる事が考えられる。また、深海底地盤の深さによっても、水圧や温度の変化からMHの安定性が異なることが考えられる。これらについては、当研究機関においてもMHの存在領域内に温度及び圧力を管理出来る恒温高圧三軸圧縮試験装置により、種々の条件下でのせん断試験を実施し、MH固結砂の力学特性を明らかにしてきた⁶⁾⁷⁾。この恒温高圧三軸圧縮試験装置を用いた要素試験では、一般的に変形などをその供試体の平均的な値として得ることで、材料定数を得る。しかし生産手法として考えられている減圧法は、井戸から局所的に水圧を減少させるため、減圧域は時間の経過と共に地盤内に広がる。そして、温度、水圧がMHの存在領域外に位置した時、MHが分解を始める。これより、MHの分解に伴う地盤の変形は、温度、圧力がMHの分解領域になる分解フロントから局所的に発生すると考えられる。そのため、変形を評価するのに十分ではない。

また、MH は砂粒子間を固結する形で存在すると考えられており、その役割はセメントによる固化と同様と考えられる。固化された土の力学特性において、せん断により変形の局所化が顕著に生じるとの報告⁸⁾がある。これらの事を踏まえると、MH 固結砂のせん断中の変形についてもその局所化について検討しておく必要がある。

そこで本論文では、前面と背面に観察窓を持つ恒温高圧平面ひずみ試験装置を開発する。開発した実験装置を用いてガス浸透法により MH を生成し、MH 固結砂の平面ひずみ圧縮試験を行う試験法を確立する。そして、MH 固結砂のせん断試験を行いマクロな応力及びひずみ挙動を計測する。またこれとともに、実験中に取得した画像によりせん断時の局所変形を調べ、MH の有無による変形挙動の違いやせん断帯内とせん断帯外での変形挙動の違いを調べることを目的としたものである。

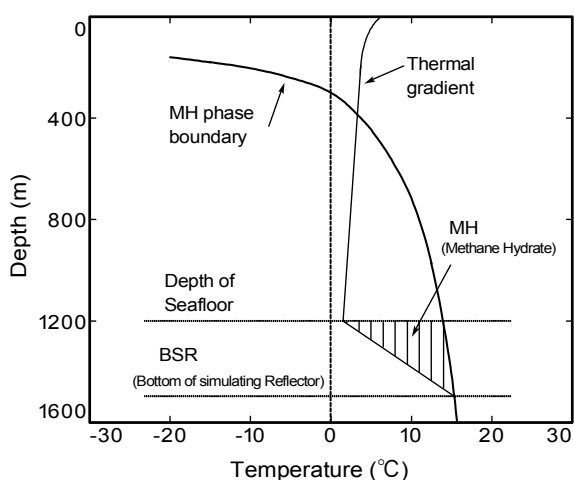


図-1 MH の存在領域 (Kvenvolden,1988)

2. 実験装置の開発

2.1 実験装置の概要

開発した恒温高圧平面ひずみ試験装置は、深海底における MH 貯留層と同様な温度環境にするために写真-1 に示す冷蔵室内に設置し温度管理を行っている。実験装置の制御および実験データの計測は、冷蔵室外に設置した PC により行う。冷蔵室の内部及び実験装置の外観を写真-2 に示す。冷蔵室内の詳細な配管系統を図-2 に示す。以下に装置の仕様について解説する。

供試体⁽¹⁾のサイズは、高さ 160mm×幅 60mm×奥行き 80mm である。透明性の高いシリコンメンブレンを用いることで様々な材料に対して観察することが可能である。圧力セル⁽²⁾は耐圧 20MPa であり、セル前面と背面にそれぞれ厚さ 140mm、直径 75mm のアクリル製の観察窓が取り付けられている。これにより、供試体前面と背面での供試体の撮影が可能となる。供試体の観察はデジタル一眼レフカメラを用いて、リモート制御によりタイマー撮影したデジタル画像に対して行う。拘束板

(3)は、厚さ 60mm のアクリル製で観察窓と一体となり中間主応力方向を拘束し、平面ひずみ状態を実現している。また、拘束板の上部・中央・下部の左右に合計 6 個の発光ダイオード(Light Emitting Diode: LED)が設置されており、供試体の撮影環境を整えている。そして、拘束板表面にはシリコングリスとオイルを配合したものを薄く塗ることで、拘束板とメンブレンとの摩擦を軽減させている。シリンジポンプ(4)、(5)、(6)、(7)は、供試体の下部及び上部にそれぞれ 2 台ずつ設置されており、水またはメタンガスの圧力制御及び体積変化の計測に用いられる。最大許容背圧は 20MPa で、モーターの制御は最小 25 パルスから最大 100000 パルスの速度で制御を行うことが可能で、体積ひずみ±0.001%の精度で計測することが可能となっている。ガスフローメーター(8)は、実験後の MH 産出量を計測するために用いる。分離槽(9)は、水とメタンガスの混合体として産出された流体を、内部で大気圧まで圧力を下げることにより、水とガスに分離させるものである。メタンガスボンベ(10)は、ガス浸透法により MH 固結砂を作製する際のメタンガスの供給源である。側液メインタンク(11)は、セル内部の加圧用の側液が入っており、側液温度管理タンク(12)によって側液の温度管理を行う事が出来る。側液圧荷装置(13)は、側液の圧力制御に用いられる。背圧回路加熱チャンバー(14)及び予熱タンク(15)は、供試体内及び管路に流れる間隙水の温度管理を行う。側液循環装置(16)は、供試体側面に温度管理された側液を長時間循環させることで供試体内の温度を側液の温度と同じくしている。変位計(17)は、軸方向の変位を計測する。最大許容変位は 100mm である。また、ロードセル(18)を用いて荷重計測を行う。最大許容荷重は 200kN であり、許容荷重の 1000 分の 1 の精度で計測可能である。そしてこのロードセルは、熱・圧力に依存しない円筒形のものを圧力セル内部へ設置しており、圧力セルと軸との摩擦を考慮する必要が無い。載荷装置(19)により、下部からセルを載荷板によって軸方向に上下させ荷重を加える。圧力計(20)により上・下の間隙水圧と側圧の測定を行う。

2.2 実験装置の精度の検証

開発した実験装置の精度の検証のため、龍岡ら⁹⁾による平面ひずみ圧縮試験と同様の試験を高圧条件下で行った。試料は豊浦砂を用い、空中落下法により供試体を作製した。供試体を自立させるため、負圧を 0.05MPa 引き、その時の間隙比 $e_{0.05}=0.75$ となるように密度管理を行った。図-3 に間隙比 $e_{0.05}=0.75$ となるように密度管理を行い、有効拘束圧 $\sigma'_c=0.05\sim 6.0\text{MPa}$ で等方圧密排水せん断試験を行った結果を示す。なお、図中には、低拘束圧域における龍岡らの結果も併せて示している。龍岡らの結果より、有効拘束圧が高くなるにつれ初期剛性及びピーク応力比が低下し、ピーク応力比が発現する軸ひずみの値が増加する拘束圧依存性を示していることが伺える。

本実験装置によって得られた有効拘束圧 $\sigma_c' = 1\text{MPa}$ 及び $\sigma_c' = 3\text{MPa}$ の結果も同様に有効拘束圧が高くなるにつれ初期剛性及びピーク応力比が低下し、ピーク応力比が発現する軸ひずみ ε_a の値が増加する傾向を示しており、本実験装置の妥当性がうかがえる。また、龍岡らの結果より、有効拘束圧が高くなるにつれ残留強度が低下するという傾向が得られているが、今回の高圧下の実験により、 $\sigma_c' = 0.05\text{MPa}$ 以上で残留強度は一定の値に収束する事が確認された。

ここで、安福¹⁰⁾によって行われた、低圧域から高圧域にかけての三軸圧縮試験の結果を図-4 と図-5 に示す。図-4 は宇部まさ土を試料として用い、初期間隙比 $e = 0.72 \sim 0.76$ となるように密度管理を行い、有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.05 \sim 6.0\text{MPa}$ で試験を行ったものである。応力比 - 軸ひずみ関係を見ると、低圧域から高圧域になるにつれ、ひずみ軟化挙動からひずみ硬化挙動へ変化し、 $\sigma_c' = 1.0\text{MPa}$ 以上で残留強度は一定の値に収束することが観察される。また、体積変化を見ると、低圧域から高圧域になるにつれ、膨張性の卓越した特性から圧縮性の卓越したものへと変化している。次に図-5 は秋穂砂を試

料として用い、初期間隙比 $e = 0.64 \sim 0.68$ となるように密度管理を行い、有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.5 \sim 15.0\text{MPa}$ で試験を行ったものである。応力比 - 軸ひずみ関係を見ると、宇部まさ土と同様に、低圧域から高圧域になるにつれ、ひずみ軟化挙動からひずみ硬化挙動へ変化し、 $\sigma_c' = 1.0\text{MPa}$ 以上で残留強度は一定の値に収束することが観察される。また、体積変化に関しても、低圧域から高圧域になるにつれ、膨張性の卓越した特性から圧縮性の卓越したものへと変化しているという宇部まさ土と同様な傾向が見られた。

この知見を踏まえて、図-3 の平面ひずみ試験の結果を見る。応力比 - 軸ひずみ関係を見ると、低圧域から高圧域になるにつれ、ひずみ軟化挙動からひずみ硬化挙動へと近づいており、ある拘束圧以上で残留強度は一定の値に収束することが観察される。また、体積変化を見ると、低圧域から高圧域になるにつれ、膨張性の卓越した特性から圧縮性の卓越したものへと変化している。平面ひずみ圧縮試験でも低圧域から高圧域にかけての挙動が三軸圧縮試験と同様の傾向であると仮定すると、本実験で得られた結果は妥当なものであると考えられる。



写真-1 冷蔵室の外観

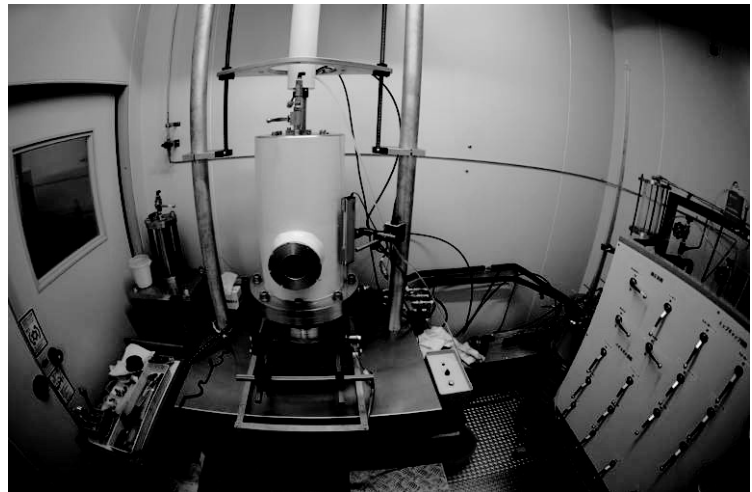


写真-2 実験装置の外観

- ① 供試体
- ② 圧力セル
- ③ 拘束板
- ④ シリンジポンプ(下・水)
- ⑤ シリンジポンプ(下・メタン)
- ⑥ シリンジポンプ(上・メタン)
- ⑦ シリンジポンプ(上・水)
- ⑧ ガスフローメーター
- ⑨ 分離槽
- ⑩ メタンガスポンプ
- ⑪ 側液メインタンク
- ⑫ 側液温度管理タンク
- ⑬ 側圧負荷装置
- ⑭ 背圧回路加熱チャンバー
- ⑮ 予熱タンク
- ⑯ 側液循環装置
- ⑰ 変位計
- ⑱ ロードセル
- ⑲ 荷重装置
- ⑳ 圧力計

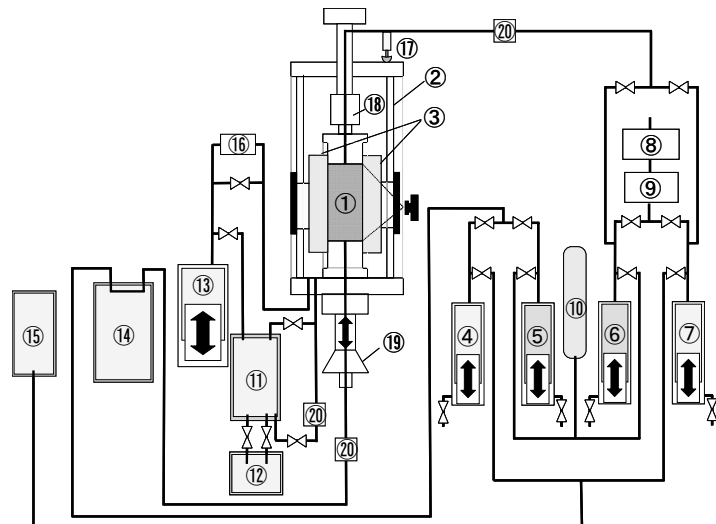


図-2 実験装置の配管系統

3. 供試体の作製成方法

3.1 初期含水比と MH 飽和度の概念

本研究では、MH 飽和度 S_{MH} を再現するために供試体の初期含水比 $w_{initial}$ を定めている。 S_{MH} は式(1)で定義され、間隙の体積 V_v に占める MH の体積 V_{MH} の割合を意味する。目標とする S_{MH} から水の量を式(2) によって算出し、目標の湿潤密度の供試体を作製した。

$$S_{MH} = \frac{V_{MH}}{V_v} \times 100 \quad (1)$$

$$w_{initial} = \frac{(S_{MH} / 100) \cdot V_v \cdot \rho_{MH}}{m_s} \cdot A \quad (2)$$

ここに $w_{initial}$ は供試体初期含水比、 ρ_{MH} は MH の密度 ($\rho_{MH} = 0.912(\text{g}/\text{cm}^3)$)、 $m_s(\text{g})$ は砂の質量であり、 A は 1 つの MH に含まれる水の質量百分率である。分子式 $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ より $A = 108/124 \times 100 = 87.1(\%)$ となる。

3.2 供試体の作製方法

試料は豊浦砂を用いた。その物理的性質を表-1 に示す。式(2)により算出された目標の MH 飽和率 S_{MH} になるように所定の含水比に調整した試料を用い、湿潤突き固め法により供試体を作製した。試料を高さ 160mm × 幅 60mm × 奥行 80mm のモールドに 12 層に分けてタンパーで相対密度 $D_r = 90\%$ となるように突き固める。この時、各層の境界面が不連続にならないようにするため、1 層突き固めるごとに表面を乱して次の層を突き固める。

表-1 試料の物理的性質

材料	土粒子密度 $\rho_s (\text{g}/\text{cm}^3)$	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}	均等係数 U_c
豊浦砂	2.643	0.973	0.635	1.20

4. 実験手順と実験条件

表-2 に実験条件を示す。MH 飽和度 $S_{MH} = 0\%$ の豊浦砂 (以下豊浦砂と呼ぶ) での試験では、前章で説明した湿潤突き固め法を用いて相対密度 $D_r = 90\%$ に密度管理した供試体を作製する。それを温度 5°C 、水圧 10MPa で有効拘束圧を 1, 3, 5MPa の条件で試験を行った。また、MH 固結砂での試験では、目標の MH 飽和度を $S_{MH} = 50\%$ とし、豊浦砂の試験の場合と同様に、湿潤突き固め法を用いて $D_r = 90\%$ に密度管理した供試体を作製する。その後 MH を生成し、温度 5°C 、水圧 10MPa で有効拘束圧を 3MPa の条件で試験を行った。図-6 に MH の安定境界線を示し、実験手順を説明する。MH 固結砂では、前章で説明した湿潤突き固め方法で豊浦砂のみの供試体を作製した後、セルを被せ、セル内に水を満たす。メタンガスボンベから上下のシリンジポンプにメタンガスを充填し、供試体上下からメタンガスを所定の圧力で圧入する。これと同時に

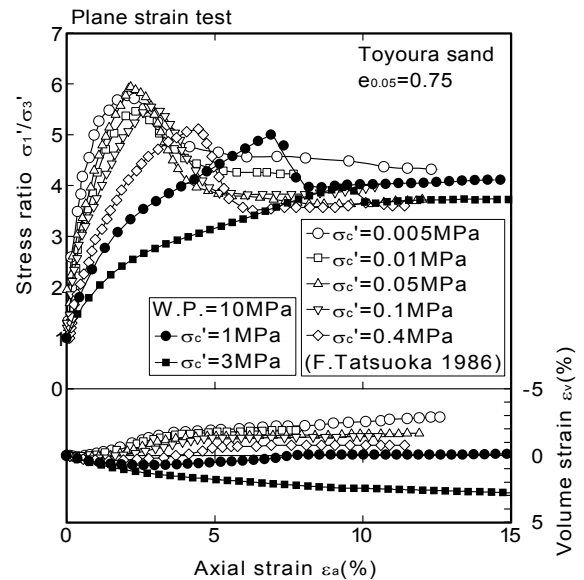


図-3 実験装置の精度の検証

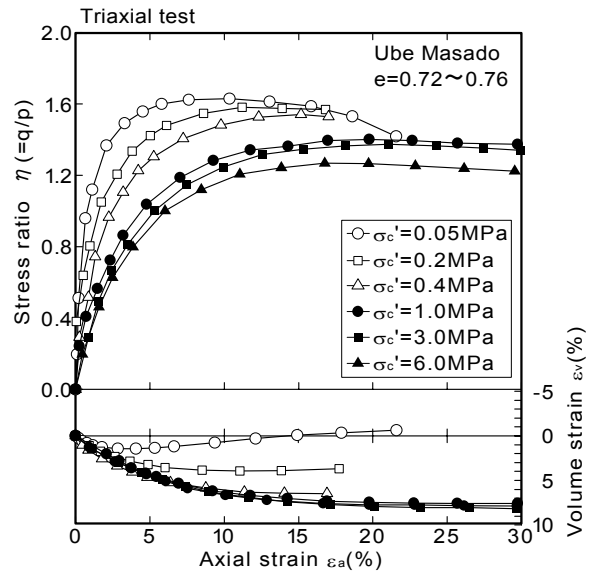


図-4 低圧域から高圧域での宇部まさ土の三軸試験結果¹⁰⁾

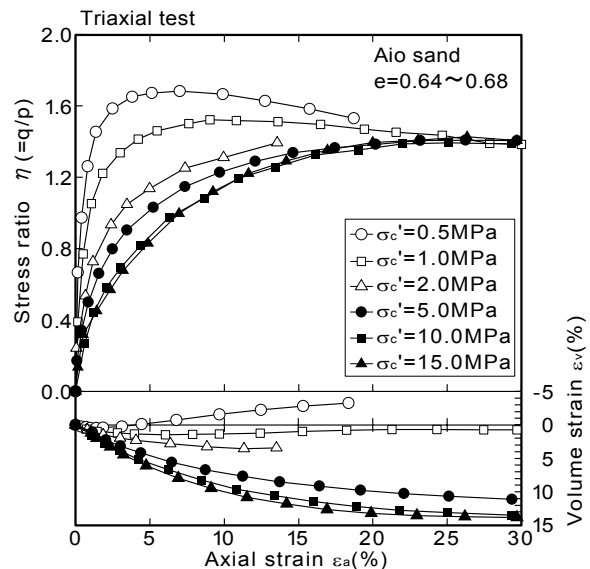


図-5 低圧域から高圧域での秋穂砂の三軸試験結果¹⁰⁾

にセル圧も上げる。これが図-6の①の状態である。供試体内をメタンガスで飽和し、時間をかけてハイドレート化させるガス浸透法により作製している。本研究では、温度 1℃、ガス圧 4MPa の条件でメタンガスをハイドレート化させている。その後、メタンガスボンベからの供給を断ち、上下のシリンジポンプのみで供試体にメタンガスを供給する。上下のシリンジポンプで計測される体積変化が定常状態になり、供試体へのメタンガスの供給がなくなることでハイドレート化の確認を行っている。

ここで、実験中の MH 飽和率の測定結果を図-7 に示す。図は測定したガス流入量を MH 飽和度へ換算した値と時間との関係を示している。実験開始から約 1 時間後に MH の生成が顕著に見え始め、時間経過とともに MH 飽和度が高くなる様子が観察された。33 時間を越えたあたりからシリンジポンプによるガス流入が落ちつき始め一定値のまま 1 時間が経過したため、MH 生成を打ち切った。図に示した例では目標の MH 飽和度を 50%としており、計測結果の MH 飽和度 44%は目標値と近い値を示した。

MH 生成後、水を満たした残りの 2 つのシリンジポンプより、圧力及び温度を保持したまま供試体内へ注水し、供試体を飽和させ、図-6の②から③の状態を経て、任意の条件に有効拘束圧・温度・間隙水圧を制御する。そして、軸ひずみ速度 0.1%/min で圧密排水せん断試験を行う。せん断終了後、生成した MH を分解するため圧力を下げ温度を上げて MH 安定境界の外に出し、メタンガス量を測定する。このメタンガス量により MH 飽和度 S_{MH} を算出している。

5. 試験結果と考察

5.1 豊浦砂

有効拘束圧 $\sigma'_c=1\text{MPa}$, 3MPa , 5MPa , 水圧 10MPa で行った豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験結果を図-8 に示し、各条件のせん断終了後の写真を写真-3 に示す。写真中のメッシュは $10\times 10\text{mm}$ である。

図-8 より、有効拘束圧の増加に伴い、初期剛性・ピーク強度 q_{\max} の増加が確認された。また、ピーク強度 q_{\max} が発現する軸ひずみ ϵ_a の値の増加が確認された。体積変化に関しては、膨張へ移行する挙動から収縮一方の挙動へと推移している様子が確認された。

有効拘束圧 $\sigma'_c=1\text{MPa}$ に着目すると、初期に軸差応力の増加とともに体積ひずみは収縮挙動を示し、その後膨張へ転じた後に軸ひずみ $\epsilon_a=5\%$ 付近で降伏し、体積ひずみはある値に落ち着いている。このとき、写真-3(a)に見られる左下がりのせん断帯の発生が確認された。しかし、その後せん断を継続すると、軸ひずみ $\epsilon_a=8\%$ 付近から体積ひずみが再び膨張傾向を示し、軸ひずみ $\epsilon_a=11\%$ で 2 回目の降伏が確認された。このとき写真の

表-2 実験条件

試験条件			相対密度 D_r (%)	MH飽和度 S_{MH} (%)
水圧 W.P. (MPa)	温度 T (°C)	有効拘束圧 σ'_c (MPa)		
10	5	1	89.0	0.0
		3	92.5	0.0
		5	88.7	0.0
		3	89.8	44.8

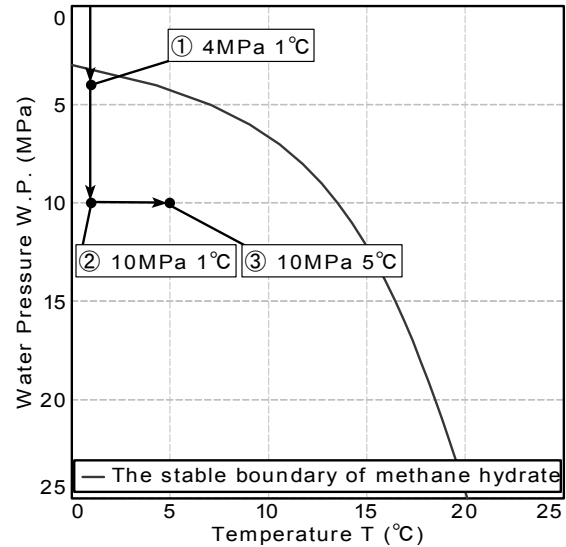


図-6 MH 安定境界線と実験中の温度・圧力履歴

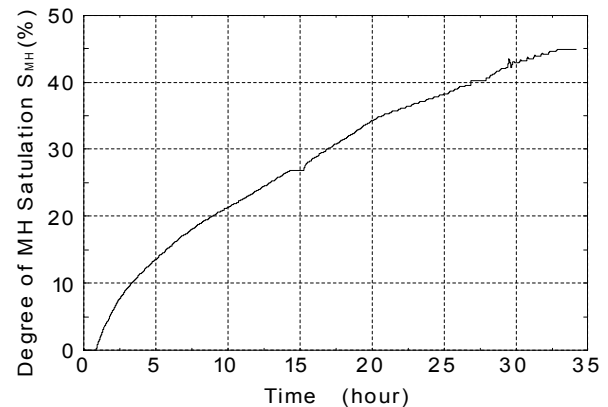


図-7 MH 飽和率の時間変化

右下がりのせん断帯が発生したことから、供試体の変形がせん断帯付近に集中していることが観察される。

5.2 MH 固結砂

図-9 に有効拘束圧 $\sigma'_c=3\text{MPa}$, 水圧 10MPa で行った本平面ひずみ圧縮試験により得られた豊浦砂と MH 飽和率 $S_{MH}=44\%$ の MH 固結砂の結果と比較のために同条件で行った軸対称三軸圧縮試験より得られた豊浦砂と $S_{MH}=50\%$ の結果を示す。なお、MH 固結砂については、MH の影響を顕著に知る¹¹⁾ ために、通水を行わない不飽和状態で実験を行った。MH 固結砂を用いた平面ひずみ圧縮試験においては、不飽和状態のため体積変化を測定しておらず、それに伴う軸差応力の断面積補正は行っていない。MH 固結砂の平面ひずみ圧縮試験における応力ひずみ関係が $\epsilon_a=6\%$ で降伏した後に定常状態にならず、軸差応力が徐々に増加していることについては、残

留強度が増加していることについては、このためであると考えられる。

まず、豊浦砂について三軸圧縮試験と平面ひずみ圧縮試験の結果を比較すると、平面ひずみ圧縮試験による方が、ピーク強度が大きく現れ、体積変化は収縮傾向を示している。これは中間主応力の影響によるものと考えられる。本研究では、MHの存在する応力レベルを対象としているため、高圧下で一連の試験を実施しているが、望月ら¹²⁾が低圧域(98, 392kPa)において豊浦砂を用いて行った三軸圧縮試験と平面ひずみ圧縮試験の対比結果と同様の傾向を示している。

また、MH固結砂の三軸圧縮試験及び平面ひずみ圧縮試験の結果では、豊浦砂に比べて初期剛性およびピーク強度の顕著な増加が認められる。これはMHが砂粒子間に固着し、砂に固結力が発揮したためと考えられる。

次に、観察窓からの供試体の写真撮影画像を写真-4に示す。写真-4(a)は、軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ のときの豊浦砂の、写真-4(b)は同じ軸ひずみ状態のMH固結砂の画像である。ここで、異なる画角のレンズを使用したため、豊浦砂は120×60mm、MH固結砂は160×60mmと写真の撮影

範囲が異なっている。豊浦砂、MH固結砂ともにせん断帯(写真-4の破線と一点鎖線)が発生し、変形の局所化が確認された。しかし、その変形のモードは豊浦砂とMH固結砂で異なっており、豊浦砂ではクロスする2本のせん断帯が形成されたのに対し、MH固結砂では、供試体にX型の大きなせん断帯(写真-4(b)の破線)が形成され、その周りに小さなせん断帯が3本(写真-4(b)の一点鎖線)形成され、供試体がいくつかに割裂される形状を示した。これはMHによる砂粒子の固結によるものであると考えられる。

5.3 取得した画像による局所変形の観察

図-10に画像から局所変形を評価するための概念図を示す。変位を与えながら画像を撮影し、ある変位のときの画像とそれからさらに変位した画像の2枚の画像を用いて、画像上での変位(pixel)を求め、それを実値(mm)に直し計測を行う。写真-5に示した豊浦砂の $\epsilon_a=0\%$ を例にとると、写真-5(a)の元画像にある10×10mmメッシュの交点に写真-5(b)のように標点を打ち、その座標を読み取る。その座標より局所的な変位を計測した。計測し

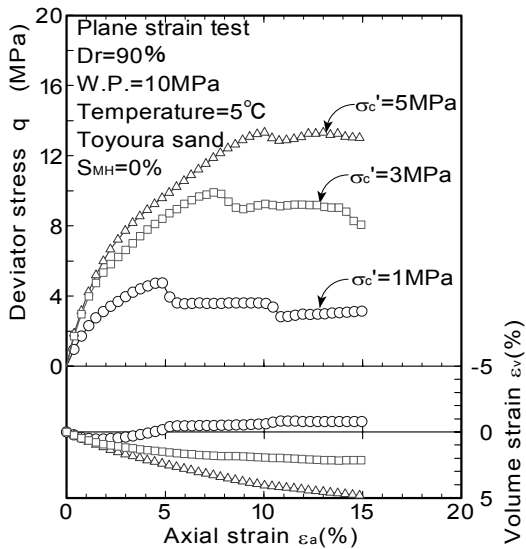


図-8 豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験結果

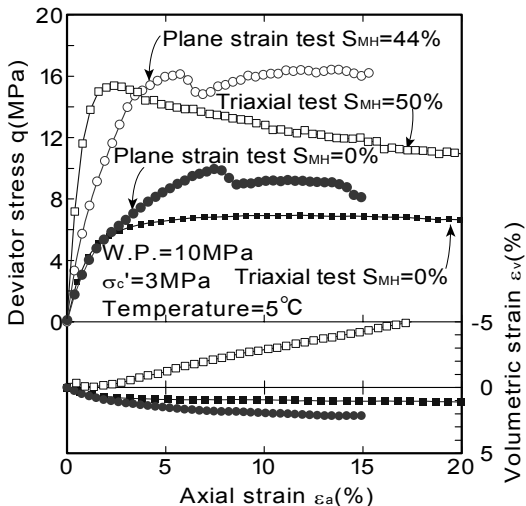
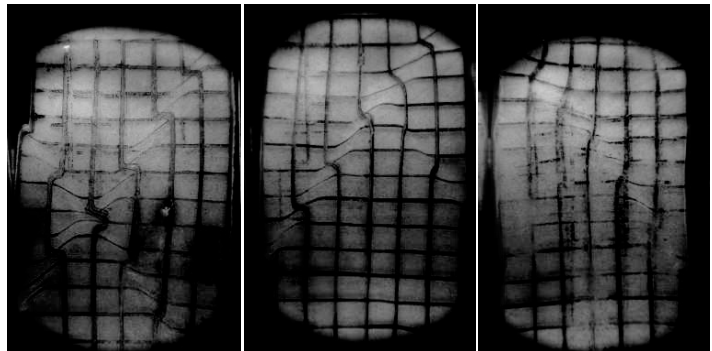
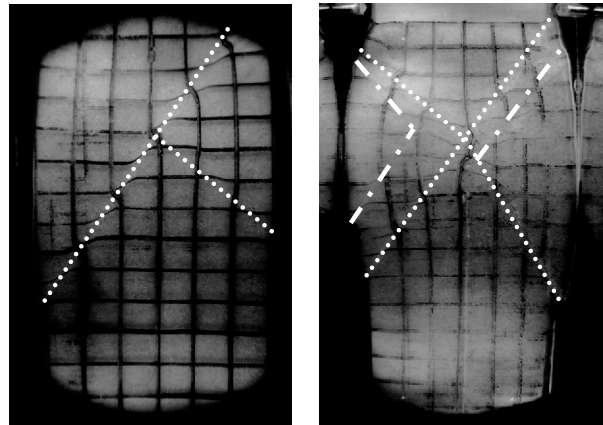


図-9 MH固結砂の平面ひずみ圧縮試験結果



(a) $\sigma'_c=1\text{MPa}$ $\epsilon_a=15\%$ (b) $\sigma'_c=3\text{MPa}$ $\epsilon_a=15\%$ (c) $\sigma'_c=5\text{MPa}$ $\epsilon_a=15\%$

写真-3 豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験後の供試体写真



(a) 豊浦砂 ($\epsilon_a=15\%$) (b) MH固結砂 ($\epsilon_a=15\%$)

写真-4 供試体の変形挙動の違い

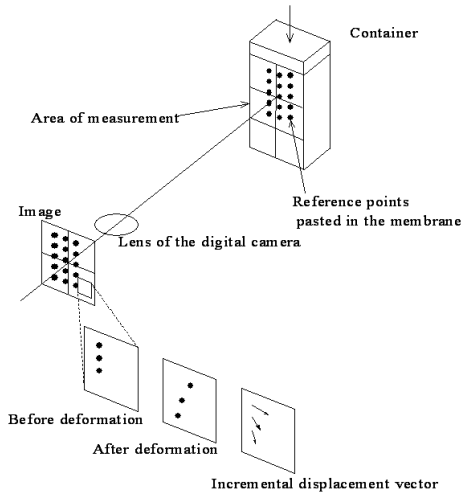
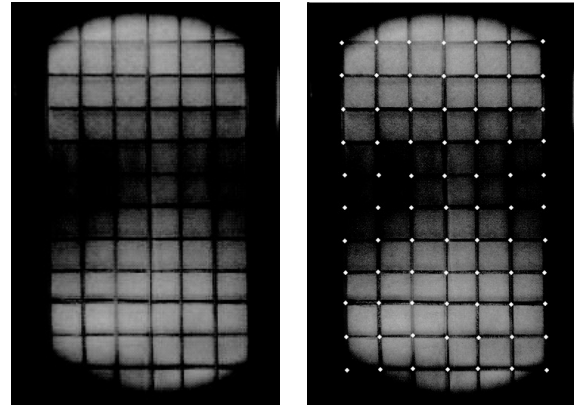
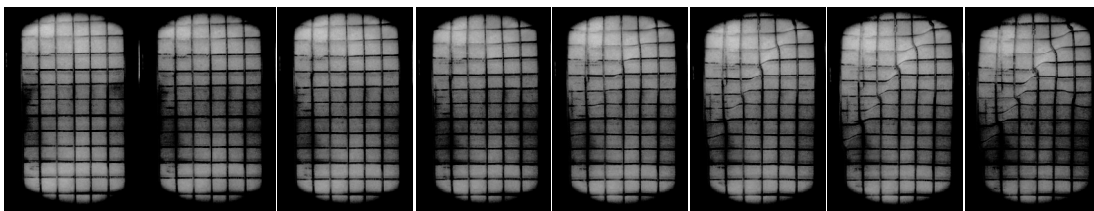


図-10 各要素の変形を評価する原理の概念図



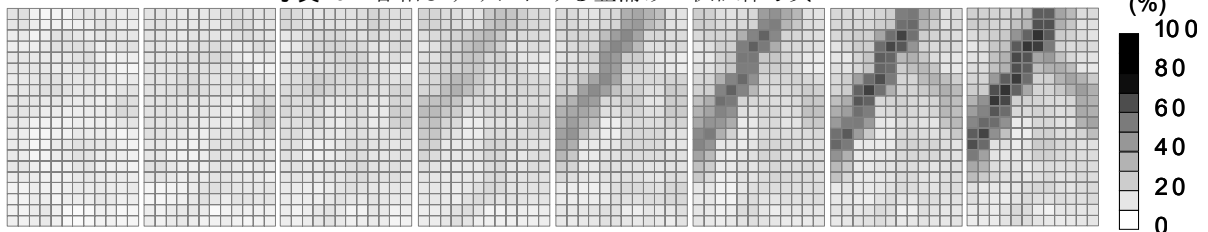
(a) 元画像 (b) 標点を打った画像

写真-5 座標の読み取り方(豊浦砂 $\epsilon_a=0\%$)



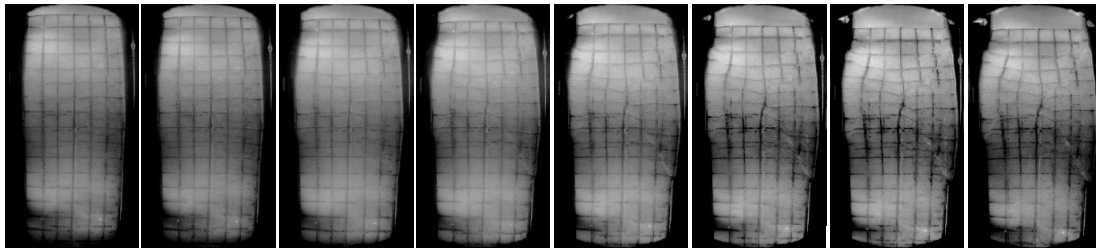
(a) $\epsilon_a=6\%$ (b) $\epsilon_a=7\%$ (c) $\epsilon_a=8\%$ (d) $\epsilon_a=9\%$ (e) $\epsilon_a=10\%$ (f) $\epsilon_a=11\%$ (g) $\epsilon_a=12\%$ (h) $\epsilon_a=13\%$

写真-6 各軸ひずみにおける豊浦砂の供試体写真



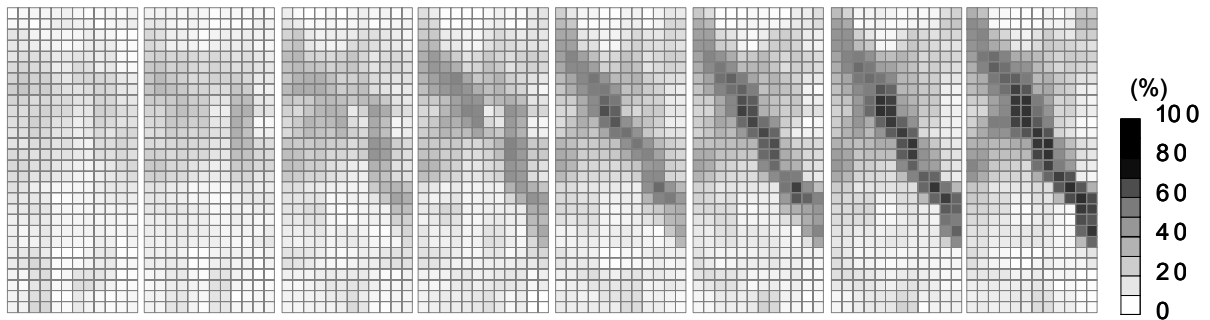
(a) $\epsilon_a=6\%$ (b) $\epsilon_a=7\%$ (c) $\epsilon_a=8\%$ (d) $\epsilon_a=9\%$ (e) $\epsilon_a=10\%$ (f) $\epsilon_a=11\%$ (g) $\epsilon_a=12\%$ (h) $\epsilon_a=13\%$

図-11 各軸ひずみにおけるせん断ひずみ γ_{max} の分布図(豊浦砂)



(a) $\epsilon_a=6\%$ (b) $\epsilon_a=7\%$ (c) $\epsilon_a=8\%$ (d) $\epsilon_a=9\%$ (e) $\epsilon_a=10\%$ (f) $\epsilon_a=11\%$ (g) $\epsilon_a=12\%$ (h) $\epsilon_a=13\%$

写真-7 各軸ひずみにおける MH 固結砂の供試体写真



(a) $\epsilon_a=6\%$ (b) $\epsilon_a=7\%$ (c) $\epsilon_a=8\%$ (d) $\epsilon_a=9\%$ (e) $\epsilon_a=10\%$ (f) $\epsilon_a=11\%$ (g) $\epsilon_a=12\%$ (h) $\epsilon_a=13\%$

図-12 各軸ひずみにおけるせん断ひずみ γ_{max} の分布図(MH 固結砂)

た局所的な変位より, x 軸を水平方向, y 軸を鉛直方向にとり, 体積ひずみ ε_v を式(3), 最大せん断ひずみ γ_{max} を式(4)によって算出した.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (3)$$

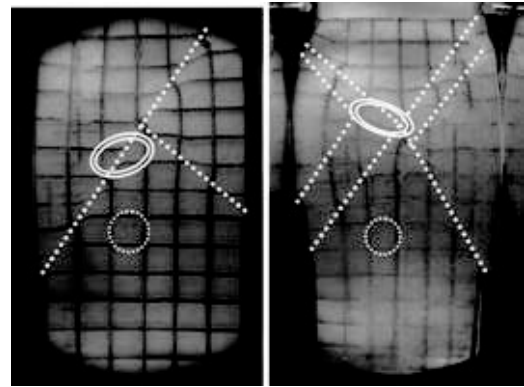
$$\gamma_{max} = \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_x)^2 + \gamma_{yx}^2} \quad (4)$$

体積ひずみ ε_v は, 収縮を正, 膨張を負としている. 最大せん断ひずみ γ_{max} は, 式からもわかるように, 正の値である.

図-11 と写真-6 に豊浦砂 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$), 図-12 と写真-7 に MH 固結砂 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) の平面ひずみ圧縮試験時に撮影した軸ひずみ 1% ごとの写真と, その写真から算出した軸ひずみごとの最大せん断ひずみの分布図を示す. 豊浦砂と MH 固結砂ともに, 軸ひずみの進行に伴ってせん断帯が発達していく様子が観察される. 図-11 と図-12 とともに左から 3 枚目の(c) $\varepsilon_a=8\%$ に着目すると, 図-11 の豊浦砂ではこの時点では, せん断帯は確認出来ない. しかし, 図-12 の MH 固結砂ではせん断帯を確認できる. これは, MH により固結された土は, 同じ密度の豊浦砂と比べてピーク強度に至る軸ひずみの値が小さいため, ひずみの局所化も軸ひずみの値が小さい時から生じていると考えられる.

写真-8 は豊浦砂 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) と MH 固結砂 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) の平面ひずみ圧縮試験の軸ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ の時の供試体写真であり, 着目したせん断帯が発生した箇所(二重線の囲み)とせん断帯が発生していない箇所(破線の囲み)のそれぞれの 1 要素を示している. 図-13 はせん断帯が発生した箇所(写真-8 の二重線の囲み)とせん断帯が発生していない箇所(写真-8 の破線の囲み)それぞれの要素に着目し, 最大せん断ひずみを軸ひずみごとに算出したものである. 豊浦砂と MH 固結砂ともに, せん断帯が発生していない箇所では最大せん断ひずみは小さい値を示しているのに対し, せん断帯が発生した箇所ではせん断帯の発達とともに最大せん断ひずみの値は増加している. これにより, 高压域においても変形の局所化が起こることが明らかとなった. また, せん断帯が発生した箇所において, MH 固結砂は豊浦砂に比べて最大せん断ひずみが低いひずみレベルから増加し始めている. このことから, 高压下であっても MH により固結された土は, 同じ密度の豊浦砂と比べてひずみの局所化が軸ひずみの値が小さい時から生じていることが確認できる.

写真-9 は写真-8 と同様に豊浦砂 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) と MH 固結砂 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) の平面ひずみ圧縮試験の軸ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ の時の供試体写真であり, 着目したせん断帯が発生した箇所(二重線の囲み)とせん断帯が発生していない箇所(破線の囲み)のそれぞれの 1 要素を示している. 写真-8 では豊浦砂 ($\sigma_c'=3\text{MPa}$) のせん断帯が発生した箇所が写真-7 で選んだ箇所と異なる. これは, せん断帯が発生した箇所の中でも体積ひずみ ε_v が顕著に変化してお



(a) 豊浦砂 ($\varepsilon_a=15\%$) (b) MH 固結砂 ($\varepsilon_a=15\%$)

写真-8 着目した要素

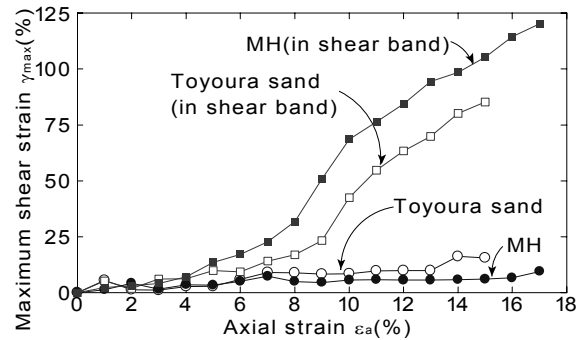
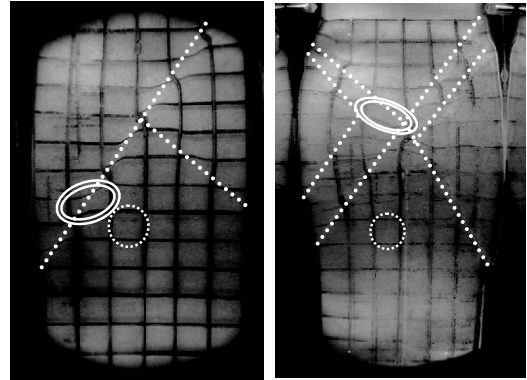


図-13 圧縮試験中のせん断帯内・外での最大せん断ひずみ γ_{max} の変化



(a) 豊浦砂 ($\varepsilon_a=15\%$) (b) MH 固結砂 ($\varepsilon_a=15\%$)

写真-9 着目した要素

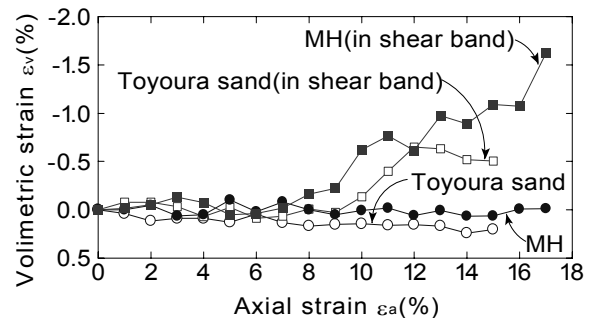


図-14 圧縮試験中のせん断帯内・外での体積ひずみ ε_v の変化

り、他との違いが分かりやすい箇所を選んだためである。

図-14 はせん断帯が発生した箇所(写真-9 の二重線の囲み)とせん断帯が発生していない箇所(写真-9 の破線の囲み)それぞれ1要素に着目し、体積変化を軸ひずみごとに算出したものである。まず、豊浦砂に着目すると、せん断帯が発生していない箇所に関しては収縮傾向を示しており、供試体全体と同じ傾向である。一方、せん断帯が発生した箇所ではせん断帯の形成とともに顕著な膨張傾向を示している。またMH固結砂に着目すると、せん断帯が発生していない箇所に関してはせん断が進んでも体積変化は見られないが、せん断帯が発生した箇所ではせん断帯の形成とともに顕著な膨張傾向が確認される。

6. おわりに

次世代資源として考えられているMH固結砂の力学特性の検討に加え、局所変形の観察をするために恒温高圧平面ひずみ試験装置を開発し、加えて平面ひずみ圧縮試験を行った。これらにより得られた知見について以下にまとめる。

- (1) 開発した実験装置を用いてガス浸透法によりMHを生成しMH固結砂の平面ひずみ圧縮試験を行う試験法を確立した。
- (2) 平面ひずみ圧縮試験の結果よりMHの固結力が確認され、平面ひずみ圧縮試験と三軸圧縮試験との比較から低圧域での既往の研究と同様の傾向を示すことが確認された。
- (3) MH固結砂の平面ひずみ圧縮試験により、MHの有無による供試体の変形挙動の違いが視覚的に確認された。
- (4) 実験中に取得した画像により変形の局所化が視覚的に確認され、MH固結砂の方が豊浦砂よりも軸ひずみの値が小さい時からひずみの局所化が生じていることが確認された。
- (5) 実験中に取得した画像により、せん断帯が発生していない箇所は供試体全体と同様な収縮傾向を示す一方、せん断帯付近ではせん断帯の形成とともに体積膨張が顕著に起こることが確認された。

このようにMH生産中にせん断応力が加わり、体積が膨張することによって、透気性が高まり、流体の移動が起こりやすくなることが予想される。この現象がMHの生産井付近で発生すると生産効率の上昇につながることが考えられる一方、メタンガスの漏洩のリスクが高まることも考えられる。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(A):課題番号20246080)の援助を受けて実施しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Katz et al., Katz, D.L., Cornell, D., Kobayashi, R., Poettmann, F.H., Vary, J.A., Elenbaas, J.R. and Weinaug, C.F.: Handbook of Natural Gas Engineering, McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1959.
- 2) Kvenvolden, K. A.: Methane hydrate-a major reservoir of carbon in the shallow geosphere, *Chemical Geology*, pp.41-51, 1988.
- 3) 佐藤幹夫, 前川竜男, 奥田義久:メタンハイドレート天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定, *地質学雑誌*, Vol.102, No.11, pp.959-971, 1996.
- 4) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム: <http://www.mh21japan.gr.jp/japanese/index.html>
- 5) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム: 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ1総括成果報告書, pp.10-16, 2008.
- 6) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Ebinuma, T.: Basic Research on the Mechanical Behavior of Methane Hydrate-sediments Mixture, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.1, pp.75-85, 2005.
- 7) 米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 海老沼孝郎:深海底地盤を模擬したガスハイドレート堆積砂の三軸圧縮特性, *地盤と建設*, Vol.25, No.1, pp.113-122, 2007.
- 8) 香月大輔:粒子の破碎強度と固結の強さに着目した固結構造を有する粒状材料の力学特性に関する研究, 山口大学理工学研究科, 博士論文, pp.87-117, 2004.
- 9) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T., Fukushima, S.: Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1 pp.65-84, 1986.
- 10) 安福規之:広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究, 山口大学理工学研究科, 博士論文, pp.33-44, 1990.
- 11) 長通讓二, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 米田純:メタンハイドレート固結砂のせん断特性, 土木学会第64回年次学術講演会, Vol.25, No.1, pp.251-252, 2009.
- 12) 望月秋利, 蔡敏, 高橋真一:砂の平面ひずみ試験と結果の整理方法, 土木学会論文集, No.475, pp.99-107, 1993.

(2010年7月5日 受付)

