論 文

南関東ガス田における貯留層泥岩の変形挙動

竹内 正次*・森川 又彦**・矢澤 仁徳***・田崎 義行*

(Received January 12, 2001; accepted November 9, 2001)

Deformation behavior of the reservoir mudstone in the Minami-Kanto gas field

Shoji Takeuchi, Matahiko Morikawa, Nintoku Yazawa and Yoshiyuki Tazaki

Abstract: The Minami-Kanto Gas Field yields natural gas dissolved in brine. The reservoir consists of alternate thin layers of sandstone and mudstone. Production of the brine from the reservoir has caused surface subsidence. Part of the produced brine has been injected back underground to reduce the subsidence.

In this study, we developed a K_0 -consolidation/swelling testing apparatus to simulate the deformation of the reservoir in a laboratory. Experiments with the apparatus were carried out on 6 mudstone core specimens from the reservoir. The results were as follows: 1) The specimens deformed plastically. 2) Some specimens continued to deform in spite of the static stress conditions. These observations suggest that the behavior can be regarded as viscous deformation. 3) The axial-strain behavior observed for the period of 72 hours could be fit to a rheological model. Calculation based on the model suggested that the viscous deformation would almost terminate in 30 days. 4) Correlation between the axial effective stress and the axial strain could be fit to an elast-plastic constitutive model.

Key words: K_0 , uniaxial strain, natural gas dissolved in water, Minami-Kanto gas field, mudstone, consolidation, swelling

1. はじめに

南関東ガス田は房総半島を中心に広がる水溶性天然ガス田であり(図1), その鉱床は鮮新統~更新統の上総層群¹⁾(表1)中に存在している。上総層群は、タービダイトを主体とした各単層が数 cm から数 m オーダーの砂泥互層と半遠洋性の泥岩層からなり、南関東ガス田の主要な生産地域である千葉県茂原付近では数度北西に傾いて分布している^{2,3)}。この付近の主要生産層は梅ヶ瀬層、大田代層、黄和田層となっている。この水溶性天然ガス鉱床には「茂原型ガス産出挙動」と呼ばれる特徴

的産出挙動がある。それは、産出ガス水比が生産初期段階から理論溶解ガス水比を上回り、生産が進むにつれさらに上昇するという現象である。その原因として砂層の圧力低下に伴い泥岩層中の遊離ガスが砂層中へ流入することが考えられている。すなわち、この泥岩層を貯留層とした流動メカニズムについては、秋林ら⁴⁾、田崎^{5,6)}が数値モデル化し、小勝ら⁷⁾が室内実験による検証を行っている。

多量のかん水を揚水する必要がある水溶性天然ガス田では地盤沈下への対応が課題となっている。南関東ガス田では、昭和40年頃から水準測量が実施されており、地盤沈下が確認されている。そのため、地盤沈下の防止を目的として、坑井数の削減や生産量の制限、あるいは、揚水したかん水の貯留層への圧入が実施されている⁸⁾。このような状況下では、貯留層の岩石はその周囲の岩石に拘束され、水平方向にはほとんど変形せず、鉛直方向に比較的大きく変形している(K_0 変形)と考えられる

* 関東天然瓦斯開発(株) Kanto Natural Gas Development Co., Ltd.

** 合同資源産業(株) Godo Shigen Sangyo Co., Ltd.

*** 石油公団石油開発技術センター Technology Research Center, Japan National Oil Corporation

図1 房総半島における水溶性ガス田の分布

表1 房総半島中・東部の層序区分
三梨ほか¹⁾を参考に作成。

地質時代	層序区分	岩 相
更新世	笠森層	泥質砂岩を主体とする
	長南層	泥岩と砂層の細かな互層からなる
	柿ノ木台層	塊状の砂質泥岩よりなり、上部に厚い砂岩が発達する
	国本層	砂勝互層部と塊状砂質泥岩層とからなる
	梅ヶ瀬層	主として砂勝互層からなり、泥勝互層を挟む
	大田代層	3つの砂勝互層と泥勝互層とが大きな単位で互層する
	黄和田層	泥岩を主体とし、薄い砂岩を挟む
	大原層	泥岩と砂岩の互層からなる
鮮新世	浪花層	主として泥岩からなり、薄い砂岩を挟む
	勝浦層	厚い砂層を挟む砂勝互層および泥勝互層からなる
	黒滝層	凝灰質砂礫層からなる

(図2)。しかしながら、かん水揚水と地盤沈下との関係およびかん水圧入の地盤沈下抑制効果は未だに定量的には把握されていない。今後も、地盤沈下の問題を考慮

図2 K₀条件下での変形

し、天然ガスの安定供給を長期にわたって継続していくために、水溶性天然ガス開発に伴う地盤変形挙動を予測し、その結果をフィードバックした開発計画を立てる必要がある。その予測技術を確認するための第一歩として南関東ガス田における貯留層の変形特性を正確に把握することが重要と考えられる。

上総層群の変形特性に関する研究はいくつか行われている^{9,10)}。しかし、それらの研究のほとんどは大型構造物の支持基盤材料としての変形特性を対象としており、想定している応力範囲やひずみ条件が異なることから、水溶性天然ガス開発に伴う地盤変形の解析にそのまま適用することは適切でないと考えられる。また、かん水圧入に伴って生じていると予想される泥岩層の膨潤挙動に関しては研究事例がなく、全く明らかにされていない。

そこで、本研究では、南関東ガス田における水溶性天然ガス開発活動に伴う地盤変形挙動の把握を目的として、原位置の応力や間隙水圧、ひずみ条件を再現できる特殊な三軸圧縮装置を製作し、それを用いて、貯留層泥岩コアの圧密および膨潤挙動を調査した。

2. 高圧 K₀ 圧密膨潤実験装置

K₀ 変形を室内で再現できる K₀ 圧密実験装置は、特に地盤工学分野の研究で開発、改良が進んでいる¹¹⁻¹³⁾。本研究で製作した高圧 K₀ 圧密膨潤実験装置（以下、K₀ 実験装置）には、それら既存の実験装置と比較して、以下に述べる特徴がある。それは、間隙水圧を最高200 kgf/cm² まで載荷することができ、さらに、それをコンピュータにより自動で制御することができる点である。また、その機能を利用して、実験初期から供試体に軸圧と間隙水圧を載荷しておき、水を排水することで圧密、そして、水を圧入することで膨潤させるといった実験方式も、従来の研究では見られなかった特徴と言える。

K₀ 実験装置の全体図を図3に示す。このフレームは

図3 高圧 K_0 圧密膨潤実験装置の全体図

図4 三軸室内の概略図

20tの常用荷重に耐えられるように設計されている。三軸室内の概略図を図4に示す。供試体は高さ7.0cm、直径3.5cmの円柱形に整形したものをを用いる。キャップとペDESTルには通水孔がそれぞれ6個あり(図5)、それらを通して、供試体に上下端面より水を排水・圧入することができるようになっている。キャップがピスト

図5 キャップ、ペDESTルの端面

ンになっており、軸応力を載荷することができる。軸ひずみは軸変位計で測定している。測定精度を高めるために、それを三軸室内部に設置している。側方応力の載荷は三軸室内に満たされた油圧で行っている。側方ひずみは箔ひずみゲージで測定している。各種応力、ひずみの計測値の記録、そして、その結果をフィードバックした応力発生装置制御命令は計測制御コンピュータが自動で行っており、 K_0 変形中に発生する側方ひずみ ε は $\pm 50 \times 10^{-6}$ 以内に収まるようになっている。

3. K_0 圧密膨潤実験

本実験の供試体には九十九里南部の新規ガス井掘削時

表2 供試体データ

試料名	Smp-1	Smp-2	Smp-3	Smp-4	Smp-5	Smp-6
坑 井	MO-2	森宮104	森宮104	石神65	早野40	DA-1
深度(m)	758	582	700	1306	878	867
地層名	梅ヶ瀬	黄和田	黄和田	大田代	黄和田	大田代
密 度	1.94	1.88	1.87	2.03	1.94	1.91

に実際の貯留層から採取した泥岩コアを用いた（表2）。以下に実験方法と実験結果について述べる。

3.1 実験方法

まず、整形した供試体をかん水で飽和させるために、かん水を満たしたピーカーに供試体を入れて負圧をかけ、真空脱気した。

その供試体を三軸室にセットした後、採取深度に応じた天然ガス開発前の初期応力状態を再現した。このとき、地盤全体の単位体積重量を 2.0 g/cm^3 と仮定して軸応力を設定した。また、原位置における応力場は不明であるため、軸応力と側方応力の比を1:1と仮定した。間隙水圧の設定に関しては、地下水の密度が 1.0 g/cm^3 、地下水位は地表面付近にあるとした。この状態で4日間等方圧密を行い、初期応力状態とした。

続いて、かん水の揚水によって貯留層が圧密する過程（以下、排水過程）を再現した。通常、フィールドでの地下水位低下は100~200 mで、貯留層圧にしておよそ10~20 kgf/cm^2 の低下を示す。そこで、間隙水圧を初期状態から段階的に30 kgf/cm^2 低下させることにした。1ステップの間隙水圧低下分を10 kgf/cm^2 とし3ステップで行った。間隙水圧の制御は供試体の上下端面で行っている。そのため、各ステップのスタート時では、供試体の端面と内部の間に圧力差（過剰間隙水圧）が生じる。供試体の浸透率を $5 \times 10^{-3}\text{ md}^D$ で一定と仮定して、ダルシー則を用いた試算を行ったところ、過剰間隙水圧は各ステップのスタートから20分程度でほとんど0となった（図6）。しかし、過剰間隙水圧が消散した後の変形挙動についても調べるために、1ステップを72時間とした。貯留層より上位の地盤の重量は変化しないとして、排水過程を通して軸応力を一定に保った。 K_0 変形と仮定しているの、側方ひずみが生じないように側方応力を制御した。

排水過程終了後、かん水の圧入によって貯留層が膨潤する過程（以下、圧入過程）を再現した。排水過程とは逆に供試体の上下端面より水を圧入し、間隙水圧を初期状態に戻した。排水過程と同様に、3ステップに分け、1ステップの間隙水圧増加分を10 kgf/cm^2 、時間を72時間とした。圧入過程を通して軸応力を一定に保ち、側方

図6 過剰間隙水圧の経時変化

凡例は供試体端面からの距離を示している。供試体中心部である端面から3.5 cmの場所では、約20分で過剰間隙水圧がほとんど0となる。

ひずみが生じないように側方応力を制御した。

以上の手順にしたがって、表2に示す貯留層泥岩6供試体について、排水過程に伴う圧密挙動、そして、圧入過程に伴う膨潤挙動の調査を行った。

3.2 実験結果

それぞれの供試体について、軸ひずみの経時的な挙動を図7に示す。前半の216時間は排水過程、後半の216時間は圧入過程である。排水過程では軸ひずみが増加つまり圧縮を示している。また、圧入過程では軸ひずみが減少つまり膨張を示している。経過時間0時間と432時間の両時点での供試体に作用する間隙水圧は同じ、すなわち有効応力は同じである。しかし、図7から明らかなように、各供試体とも432時間経過時点での軸ひずみは0とはなっていない。つまり、排水過程で生じた軸ひずみは、圧入過程で初期状態の間隙水圧に戻しても一部しか回復しない結果となった。ここで、各供試体について圧入効果を比較するために、排水過程で生じた軸ひずみに対する圧入過程で回復したその割合を軸ひずみ回復率と定義し、その値を表3に示す。軸ひずみ回復率は46.3%~70.7%の範囲であった。

Smp-3を例として、各ステップ終了時の軸ひずみと付加軸有効応力の関係を図8に示す。これより、同一供試体の同一過程では、それらの関係はほぼ直線的であり、この応力変化の範囲では圧縮性に大きな変化は見られなかった。このことは他の供試体においても同様であった。

図7の排水過程に注目して1つのステップの軸ひずみ挙動を観察すると、それぞれの供試体は各ステップ初期時点と比較的大きく変形し、その後は緩慢に変形する傾向が見られた。一方、圧入過程では、どの供試体におい

図7 軸ひずみの経時変化

表3 軸ひずみ回復率(%)

Smp-1	Smp-2	Smp-3	Smp-4	Smp-5	Smp-6
59.4	70.7	46.3	55.7	53.6	56.8

でも緩慢な変形は顕著に現れなかった。

4. 実験結果の解析

4.1 レオロジーモデルの適用

排水過程の緩慢な変形の様式は次の3つのケースに分類することができる。それは、緩慢な変形が、1) 1ステップ終了時点まで継続する(例: Smp-1 排水過程第1ステップ)、2) 1ステップを通してほとんど見られない(例: Smp-2 の排水過程第1ステップ)、3) 時間経過とともに小さくなり、1ステップ終了時点にはほとんど終息する(例: Smp-5 排水過程第3ステップ)、である。これらのうち2)、3) のケースでは、供試体の変形は1ステップ終了時にはほとんど終息しており、それ以

図8 軸ひずみと付加軸有効応力の関係

降も大きく変形することはないと考えられる。ただし、1) のケースでは、供試体の変形はその時点でも継続しているため、それ以降も変形が進行する可能性がある

供試体の変形中に浸透率は変化しないと仮定すると、1ステップスタート時点から20分程度で過剰間隙水圧は消散し、それ以降、供試体に作用する有効応力は一定であると考えられる。ところが、実験の軸ひずみ挙動をみると、その状態であっても変形は進行している。これ

は、応力の変化によらない時間依存性の粘性変形である可能性がある。そこで、1ステップの軸ひずみ挙動をレオロジーモデルで表現し、さらにそのモデルを用いて長期にわたる軸ひずみ挙動を予測してみた。

実験で観察された1ステップの軸ひずみ挙動は、過圧密粘土や堆積軟岩の粘弾性挙動解析に広く用いられている^{14,15)} 3要素フォークトモデルの挙動に類似している。このモデルは図9に示す要素の組み合わせであり、次式で表現される¹⁶⁾。

$$\varepsilon_v = \left[\frac{1}{2G_0} + \frac{1}{2G_1} \left(1 - e^{-(G_1/\eta)t} \right) \right] \Delta\sigma_v' \quad (1)$$

ここで、

ε_v : 軸ひずみ

$\Delta\sigma_v'$: 付加軸有効応力 [kgf/cm²]

G_0 : ダッシュポットと直列につないだバネの変形係数 [kgf/cm²]

図9 3要素フォークトモデル

G_1 : ダッシュポットと並列につないだバネの変形係数 [kgf/cm²]

η : ダッシュポットの粘度 [(kgf/cm²) · min]

t : 圧密スタートからの経過時間 [min]

このレオロジーモデルを用いて、バネの変形係数およびダッシュポットの粘度を変化させ圧密スタートから72時間経過時点までの軸ひずみ挙動について計算値と実験値をマッチングさせてみた。実験では、同一供試体においても、応力レベルによって軸ひずみ挙動に違いが見られた。よって、ステップごとに物性値の設定を行った。

Smp-1 排水過程第1ステップについて行ったマッチングの結果を図10に示す。この図から、今回用いたレオロジーモデルは対象としている軸ひずみ挙動を良く表現していると考えられる。その他の供試体についても同様であった。各ステップについてマッチングした時の各パラメータ値を表4に示す。

さらに、マッチングした時のパラメータ値をベースにして圧密スタートから30日および365日経過した時点での軸ひずみを計算した。計算結果を表5に示す。この表より、72時間経過時点から30日経過時点までは軸ひずみの増加が見られると予測される。しかし、30日経過時点から365日経過時点までについては、軸ひずみの増加がほとんど見られないと予測される。

以上の結果から、実験結果に現れた粘性変形と見なされる変形挙動は、間隙水圧が一定になれば、長期的には終息するものと考えられる。

4.2 弾塑性モデルの適用

本研究と一連の研究として、南関東ガス田の地盤沈下を予測するための応力解析プログラムが開発された¹⁷⁾。そのプログラムには構成式の1つとして関口・太田モデ

図10 3要素フォークトモデルのマッチング結果

表4 マッチング時の3要素フォークトモデルのパラメータ

供試体 (ステップ)	G_0 [kgf/cm ²]	G_1 [kgf/cm ²]	η [(kgf/cm ²)·min]
Smp-1(1)	10000	20000	25000000
Smp-1(2)	9000	15000	20000000
Smp-1(3)	10500	13500	20000000
Smp-2(1)	16000	50000	70000000
Smp-2(2)	12500	45000	70000000
Smp-2(3)	12500	40000	50000000
Smp-3(1)	11000	11000	30000000
Smp-3(2)	10000	17000	23000000
Smp-3(3)	12000	19000	30000000
Smp-4(1)	18000	50000	70000000
Smp-4(2)	16000	36000	50000000
Smp-4(3)	17000	18000	35000000
Smp-5(1)	7000	30000	50000000
Smp-5(2)	11000	17000	30000000
Smp-5(3)	11000	16000	20000000
Smp-6(1)	12000	30000	50000000
Smp-6(2)	12000	28000	40000000
Smp-6(3)	13500	29000	30000000

表5 3要素フォークトモデルによる軸ひずみの試算

供試体 (ステップ)	72時間	30日	365日
Smp-1(1)	0.000742	0.000750	0.000750
Smp-1(2)	0.000876	0.000889	0.000889
Smp-1(3)	0.000826	0.000847	0.000847
Smp-2(1)	0.000408	0.000412	0.000413
Smp-2(2)	0.000489	0.000511	0.000511
Smp-2(3)	0.000521	0.000525	0.000525
Smp-3(1)	0.000816	0.000909	0.000909
Smp-3(2)	0.000782	0.000794	0.000794
Smp-3(3)	0.000663	0.000680	0.000680
Smp-4(1)	0.000373	0.000378	0.000378
Smp-4(2)	0.000451	0.000451	0.000451
Smp-4(3)	0.000542	0.000572	0.000572
Smp-5(1)	0.000869	0.000881	0.000881
Smp-5(2)	0.000724	0.000749	0.000749
Smp-5(3)	0.000757	0.000767	0.000767
Smp-6(1)	0.000571	0.000583	0.000583
Smp-6(2)	0.000586	0.000595	0.000595
Smp-6(3)	0.000540	0.000543	0.000543

ル^{18,19)}が組み込まれている。このモデルでは、ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ と応力状態 σ_{ij} との関係は塑性ポテンシャルを用いると次式のように表される。

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

ここで、

$d\lambda$: 応力状態や载荷履歴に依存する量

また、関連流れ則であるため、塑性ポテンシャル g と降伏関数 f が一致する。降伏関数は次式で与えられている。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{P}{P_0} + D\eta^* - \nu^p \quad (3)$$

ここで、

λ : 圧縮性を表すパラメータ

κ : 膨潤性を表すパラメータ

P_0 : 先行圧密応力

P : 平均有効応力

e_0 : 初期間隙比

D : ダイレイタンシーを表すパラメータ

η^* : 応力比パラメータ

ν^p : 体積ひずみ

この式によって、弾性域あるいは塑性域といった弾塑性材料の状態が定義される。

関口・太田モデルは土質基礎地盤の変形解析に広く用いられている。しかし、石油や天然ガスの貯留層の変形解析に適用した例はない。そこで、本実験で得られた排水過程と圧入過程を含む一連の変形挙動に対して、このモデルの適用性を検討してみた。

解析モデルは、供試体を単純化した図11に示す1要素の直方体モデル (3.5 cm × 3.5 cm × 7.0 cm) とした。境界条件は8節点のうち下の4点は固定、上の4点は鉛直方向のみ自由とし K_0 条件を再現した。

解析条件は実験条件に従って設定した。まず、供試体の採取深度に応じた初期状態の有効応力を载荷した。その後、排水過程では30 kgf/cm²の軸有効応力増加分を3ステップに分けて1ステップ10 kgf/cm²づつ载荷し、圧入過程では30 kgf/cm²の軸有効応力減少分を3ステップに分けて1ステップ10 kgf/cm²づつ除荷した。土質定数は、過圧密比を1、ポアソン比を0.4、間隙比を0.8、ダイレイタンシーを0.1とした。以上のパラメータをすべての供試体で統一し、 λ , κ を変化させて実験値と計算値をマッチングさせた。ここに、 λ は0.434 C_c 、 κ は0.434 C_s である。ただし、 C_c 、 C_s はそれぞれ圧縮指数および膨潤指数である。

供試体 Smp-5 の実験についてマッチングを行った結果を図12に示す。この図から、排水過程と圧入過程を通して実験値と計算値が良くマッチングしていることが見て取れる。その他の供試体についても同様であった。各供試体について、マッチングした時の λ , κ の値を表6に示す。

図11 数値解析モデル

図12 数値解析マッチング結果

表6 数値解析におけるマッチング時のパラメータ

	Smp-1	Smp-2	Smp-3	Smp-4	Smp-5	Smp-6
λ	0.0950	0.0650	0.1250	0.1050	0.1100	0.1050
κ	0.0080	0.0050	0.0051	0.0070	0.0075	0.0060

5. 考 察

水溶性天然ガス貯留層となっている上総層群堆積岩の圧密降伏応力は $170 \sim 260 \text{ kgf/cm}^2$ である²⁰⁾。また、過圧密比は深度200m以深でおよそ2となる²¹⁾。これらのことは、貯留層が過圧密領域の応力状態に置かれていることを示している。実験から軸ひずみと付加軸有効応力の関係はほぼ直線的で圧縮性に大きな変化は見られなかった。このことから、実験の応力範囲内では、供試体は圧密降伏応力以下の過圧密領域の範囲内で変形してい

ると考えられる。一般に地盤材料を扱うとき、過圧密領域では弾性体とするのが普通である。ところが、本実験では、軸ひずみ回復率は46.3~70.7%となっており、塑性成分も無視できない。したがって、かん水の揚水とその圧入を含めた水溶性天然ガス開発の視点から貯留層泥岩の変形を見る場合、地盤材料を弾塑性体として扱う必要があると考えられる。

前述のように、供試体の変形に時間依存性の粘性ではないかと思われる変形が観察され、その挙動をレオロジーモデルを用いて解析した結果、その粘性変形はある程度時間がたつと終息すると考えられる。ところが、時間依存性の変形には粘性変形以外のものも考えられる。上総層群の泥岩については、間隙率と浸透率の間に相関関係が認められている²²⁾。よって、供試体の圧密の進行に伴って浸透率が低下し、排水に時間がかかる可能性も考えられる。ただし、今回の実験では供試体の変形量が微量であり、浸透率が大きく変化することはないと考えられる。また、浸透率が低下した場合でも、過剰間隙水圧の消散には72時間もかからないと考えられる。

弾塑性の構成式にはカムクレイモデル²³⁾、関口・太田モデル、足立・岡モデル²⁴⁾などが知られている。その中で、異方圧密された土の重要な挙動を表現できること、入力パラメータが複雑でなく扱いやすいこと、また、適用例も多くその実績も広く評価されていることなどから、前述の地盤沈下予測プログラムには関口・太田モデルを選択した。そこで本研究では、このモデルで供試体の変形をうまく表現できるかどうかを検討した。このとき、過圧密領域であり本来ならば2程度である過圧密比を1とする必要があった。つまりこれは、かん水の揚水および圧入による微量な貯留層変形問題においては上総層群泥岩を塑性として扱わなければならないことを意味していると考えられる。

フィールドでは、実験条件の様に間隙水圧が瞬時に 10 kgf/cm^2 も低下することはなく、また、泥層も厚いため過剰間隙水圧の消散にも実験条件下よりもさらに時間がかかると考えられる。したがって、有効応力変化は実験条件と比較してより緩慢となることが予想される。この場合、粘性的な性質や弾塑性的な性質が実験で見られたものとは異ってくることも考えられる。有効応力変化が緩慢なときにも、3要素フォークトモデルや弾塑性の関口・太田モデルが適用できるかについてはさらに検討する必要がある。

6. ま と め

本研究では、南関東ガス田貯留層の変形をできるだけ正確に再現する目的で製作した高圧 K_0 圧密膨潤実験装

置を用いて、かん水の揚水と圧入を想定した貯留層泥岩の圧密膨潤実験を行った。その結果、貯留層は過圧密領域内で変形していることが判明した。しかし、軸ひずみ回復率が46.3~70.7%であったことから、弾塑性体として扱う必要があると考えられた。また、1ステップの軸ひずみ挙動でみた場合、供試体に作用する有効応力が一定になった後も、供試体の変形が進行する現象が見られた。これを粘性変形と考え3要素フォークトモデルによる解析を行ったところ、長期的には終息すると予測された。したがって、排水過程と圧入過程を含めた一連の変形挙動に対し弾塑性のモデル（関口・太田モデル）を適用してみたところ、計算結果と実験結果が良くマッチングした。このことは、南関東ガス田の地盤沈下という貯留層変形問題には弾塑性モデルで対応できることを示していると考えられる。

謝 辞

本研究は、石油公団と水溶性天然ガス開発会社8社との共同研究「水溶性天然ガス採取技術開発」の一環として行われた。実験実施にあたっては、株式会社ダイヤコンサルタント技術研究所の方々に多大なご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表したい。

SI単位換算係数

$$\begin{aligned} \text{kgf/cm}^2 \times 9.80665^* & \quad E+04 = \text{Pa} \\ \text{md} \times 9.86923 & \quad E-16 = \text{m}^2 \end{aligned}$$

* は正確な値

引 用 文 献

- 三梨ほか, 1979: 東京湾とその周辺地域の地質。特殊地域図 (20), 地質調査所10万分の1地質説明書, 91p.
- 鈴木尉元・小玉喜三郎・三梨 昂, 1983: 房総半島における上総層群の堆積と構造運動。地質調査所月報, **34** (4), 183-190.
- 石和田靖章・三梨 昂・品田芳二郎・牧野登喜男編, 1971: 日本油田・ガス田図10「茂原」。地質調査所。
- 秋林智・周 萍, 1986: 茂原型水溶性ガス貯留層における産出挙動の予測モデル。石技誌, **51** (6), 486-491.
- 田崎義行, 1988: 水溶性天然ガス鉱床とsand/silt system。石技誌, **53** (4), 256-264.
- 田崎義行, 1992: 茂原ガス田の産出挙動と毛細管圧力の関係について。石技誌, **57** (2), 151-156.
- 小勝 武・田崎義行, 2001: 室内実験による茂原型ガス産出挙動の検証。石技誌, **66** (2), 215-224.
- 堀口克実, 1998: 千葉県の水溶性天然ガスフィールドの現状。石技誌, **63** (6), 475-484.
- 星野一男・渡辺浩平・傳田 篤・釜井俊孝, 1990: 房総半島における深部泥岩層の力学特性, 土質工学研究発表会講演集, 25, 1119-1120.
- 細野高康・中島雅之・小泉和広・杉田信隆・小川正二, 1993: 上総層群中部層シルト岩の強度・変形特性。応用地質, **34** (5), 233-244.
- 赤井浩一・足立紀尚, 1975: 三軸圧縮試験とその制御ならびに計測。土質工学シンポジウム, 20, 125-128.
- 大河内保彦・龍岡文夫・山田真一, 1980: 新しいK₀圧密試験方法。土質工学研究発表会講演集, 15, 249-252.
- 三田地利之・橋詰哲治・福田文彦, 工藤 豊, 1995: 自動制御による粘性土の三軸K₀圧密試験方法について。土木学会北海道支部技術報告集, 35, 68-75.
- Di Benedetto, H. and Tatsuo, F., 1997: Small strain behavior of geomaterials. *Soils And Foundations*, **37** (2), 127-138.
- Feng Jiang and Mehta, A. J., 1994: Significance of mud rheology in predicting wave dissipation, *BOSS*, **94** (1), 305-320.
- 地盤工学会編, 1987: 堆積軟岩の工学的性質とその応用。地盤工学会。
- 石油公団ほか, 2000: 共同研究「水溶性天然ガス採取技術開発」最終成果報告書。
- Sekiguchi, H. and Ohta, H., 1977: Induced anisotropy and time dependency in clays. *Constitutive Equations of Soils, Proc. Specialty Session 9, Ninth Int. Conf. SMFE, Tokyo*, 229-238.
- Ohta, H. and Sekiguchi, H., 1977: Constitutive equations considering anisotropy and stress reorientation in clay. *Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen*, A. A. Balkema, Rotterdam, 475-484.
- 細野高康・小泉和広・杉田信隆・小川正二, 1993: 上総層群の高圧圧密特性。応用地質, **34** (5), 15-24.
- 川崎 了・西 好一・藤原義一・岡本敏郎, 1993: 圧縮空気貯蔵のための大深度軟岩地盤の力学特性の解明, 電力中央研究所報告。
- 細谷真一・徳永朋祥・小島圭二・登坂博行・高橋学, 1995: 三軸圧縮試験機による堆積軟岩の高圧K₀圧密試験, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 26, 271-275.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, 1963: Yielding of clays in state wetter than critical. *Geotechnique*, **13**, 211-240.
- 足立紀尚・岡二三生, 1992: 軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式。土木学会論文集, 455, III-18, 9-16.