メタンハイドレート生産井における ケーシング-セメント間の摩擦強度に関する基礎的研究* -メタンハイドレート開発における坑井の安定性に関する基礎的研究(第1報)-

覺 本 真 代¹ 米 田 純² 宮 崎 晋 行³
天 満 則 夫⁴ 青 木 一 男⁵ 糸 井 龍 一⁶

Basic Study on the Frictional Strength between the Casing and Cement in a Methane Hydrate Production Well - Basic Studies of Well Stability for Methane Hydrate Development (Part 1) -

by Masayo KAKUMOTO^a, Jun YONEDA^{b*}, Kuniyuki MIYAZAKI^b,
Norio TENMA^b, Kazuo AOKI^b and Ryuichi ITOI^a

- a. Department of Earth Resources Engineering, Kyusyu University, 744 Motooka, Nishi-ku,
Fukuoka 819-0395, Japan
b. National Institute of Advance Industrial Science and Technology (AIST), 16-1 Onogawa,
Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan (*Corresponding author, E-mail: jun.yoneda@aist.go.jp)

In a project of methane gas extraction from a methane hydrate (MH) bearing sand formation in marine sediments, a production well is drilled into the sea floor from a marine platform. The depressurization method has been proposed for extracting methane gas. During the depressurization operation, sediment deformation and consolidation occurs because of MH dissociation and increases in the effective stress. This ingenerates friction on the production well, and shear failure may occur. These problems may cause gas leakage and depressurization impediment. Therefore, to ensure reliability of the well, it is very important to understand the frictional strength between the well and the sediments. The well consists of casing and cement, and it has three interface types: casing-cement, casing-sediment (sand or clay), and cement-sediment. In this study, we prepared simulated interface samples using steel rods (surface roughness: $R_z = 2.7, 14.7, \text{ and } 30.0 \mu\text{m}$) and Class G cement. Moreover, a push-out test was carried out on these samples under different effective confining pressures. The test results showed that the maximum friction is not affected by the water-cement ratio of the cement, but it tended to increase depending on the effective confining pressure and the surface roughness. From these results, we expressed the maximum friction as a function of the effective confining pressure and the surface roughness.

KEY WORDS: Methane Hydrate, Production Well, Cement, Frictional Strength, Effective Confining Pressure, Roughness

1. は じ め に

日本近海の海洋堆積層中にはメタンハイドレート (Methane Hydrate, 以下, MH) が賦存していることが確認されており, 近年, 石油や石炭に代わる国産エネルギー資源として開発が期待されている¹⁻³⁾。海洋堆積物中の MH 貯留層からメタンガスを生産する手法として, 熱刺激法, 減圧法, インヒビター圧入法が提案されている⁴⁾。これらはすべて原位置で MH を水とガスに分解し, メタンガスを生産する手法であるが, 現時点では生産効率や経済

性の観点から減圧法が最も有効であるとされている⁵⁾。この減圧法は, MH 層に掘削された生産井内の水をポンプで排水し, 坑底付近を減圧することにより原位置で MH を水とメタンガスに分解しメタンガスを生産する手法である。Fig. 1 に現在考えられている MH 生産井および周辺の地層との関係を示した模式図を示す。生産井はケーシングおよびセメントペースト (以下, セメント) で構成されており, それらは地層と接触している。つまり, 生産井と地層との間にはケーシング-セメント, ケーシング-地層, そして, セメント-地層の3種類の接触面が存在する。減圧法適用時には, 地層中の間隙水圧の低下に伴う有効応力増加や MH の分解に伴う MH 層の骨格構造の変化により, 海底地盤の圧密や変形が生じることが考えられる⁵⁻⁸⁾。すなわち, 井戸周辺の地層は減圧域に引っ張られる方向に力が作用し, 減圧域上部では沈下, そして減圧域下部では隆起が生じることが考えられる。その際, 接触面において滑りが発生し, その時の摩擦力が原因で生産井のせん断破壊や引っ張り破壊が起こる可能性も危惧される。このような現象は生産井の損傷を招き, 流路形成やガス漏洩, 減圧障害といった問題を引き起こすことが懸念される。従って, こ

*2012年10月11日受付 2013年1月21日受理

1. 学生会員 九州大学 大学院工学府 地球資源システム学専攻
2. 正会員 工博 (独) 産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター 研究員
3. 正会員 工博 (独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 研究員
4. 正会員 工博 (独) 産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター 副研究センター長
5. 正会員 工博 (独) 産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター 招聘研究員
6. 正会員 工博 九州大学 大学院工学府 地球資源システム工学部門 教授
[著者連絡先] E-mail: jun.yoneda@aist.go.jp
キーワード: メタンハイドレート, 生産井, セメント, 摩擦強度, 有効拘束圧, 表面粗さ

Fig.1 Schematic of production well and its interface with cement and sand formation.

これらの問題を適切に検討するためにも生産井と地層間に形成される異種材料間の摩擦強度を把握し、生産井の健全性を評価することが重要な研究課題の一つといえる。

摩擦強度は接触面に発生する摩擦に支配される。摩擦は物体が接触し相対運動をする時に生じる抵抗であり、摩擦力は、この接触面をせん断するのに要する力である。一般に、クーロン・アモントンの法則と呼ばれる経験則が成り立つことが知られており、摩擦力を F 、垂直抗力を N とすると $F = \mu N$ と表すことができる。ここに μ は摩擦係数と呼ばれる値である。摩擦係数は接触面の物質、形状、表面状態、潤滑剤の有無などによって定まるが、これらの影響により様々な様相を示すことが知られている⁹⁾。鋼材とセメント系材料（モルタルおよびコンクリート）の摩擦については、モルタルの強度が高いほどモルタル鋼材間の摩擦係数は大きくなり、圧着されたコンクリート鋼材間での摩擦係数はコンクリートの表面状態より鋼材の表面状態の影響を受ける¹⁰⁾。その他、坑井のケーシングセメント固結地層を模擬した供試体に対し拘束圧を負荷し、ケーシングを滑らせることで接触面のせん断応力を測定し、その値を用いて地層に設置された傾斜井戸の周りに作用するせん断応力を推定した報告もある¹¹⁾。さらに、生産井の健全性に関するシミュレーションもいくつか行われており、坑井に作用する直応力やせん断応力、セメントの変形について解析するための生産井構造モデルの提案¹²⁾や坑井と地層との接触面の破壊やセメントの変形に関して検証した報告がある¹³⁾。

このように、異種材料間の摩擦強度や生産井の健全性に関していくつかの報告があるが、これまでにMH生産井が設置されるような大水深かつ未固結地層に関する接触面の摩擦特性についての研究は見あたらない。先述のように、接触面にはいくつか種類があるが、地層との接触面では地層が未固結であるためケーシングやセメントと比べると明らかに弱く、地層との接触面の強度は未固結地層のせん断強度に依存すると考えられる。しかし、MHの開発の際に用いられる減圧法では、セメントそのものが引っ張られる可能性が考えられる。そこで、本研究では、数種類ある接触面の内、初めの取り掛かりとしてケーシングセメント間の接触面を対象とした。そして、MH賦存域に相当する拘束圧を負荷

Fig.2 Specimen for push-out test.

Fig.3 Schematic of simulated sample.

することができる押し抜き試験装置を開発し、さらに接触面模擬供試体の押し抜き試験を行うことにより、異種材料間の接触面の力学的特性を明らかにすることを目的とした。

2. 押し抜き試験

本研究では、Fig. 2 に示す円柱形供試体を用い、中央の鋼棒に荷重を加えることにより鋼棒を押し出し、摩擦強度を測定する試験を行った。以後、この試験を押し抜き試験と呼ぶ。供試体は生産井を模擬するために円柱形となっており、鋼棒、セメント、砂等様々な組み合わせで作製することが可能である。本研究においてはケーシングセメント接触面を対象としているため、鋼棒およびセメントを使用して作製した。

3. 水セメント比の摩擦強度への影響

3・1 供試体の作製

押し抜き試験に使用した接触面模擬供試体の概略図を Fig. 3 に示す。供試体は、ケーシングに見立てた鋼棒（直径 30mm、高さ 113mm）とパイプ（内径 100mm、高さ 100mm）、そしてセメントからできており、これにより、生産井のケーシングセメント間を模擬した。生産井は Fig. 1 に示すように径の異なるケーシングが重なり二重管となっている部分がある。この供試体は、その二重管部分を模擬しており、セメントの水平方向への膨張は拘束される。セメントは、代表的な油井セメントであるクラス G セメントを用いた。クラス G セメントは、製造の過程で混ぜものを加えることが禁じられており¹⁴⁾、使用の際は深度および温度条件に適用させるため速硬剤や遅硬剤を添加して使用するのが基本である。しかしながら、本研究においてはそれらの添加剤は加えずセメントと水のみを使用し、添加剤の影響を受けない供試体を作製した。供試体作製手順は、まず鋼棒と鋼製パイプにより形成された空間にセメントスラリーを流し込み、10℃に設定した恒温室で一日放置する。セメントスラリーが固化したら水中養生とする。養生日数は7日間とした。なお、セメントスラリーの作製は API (American Petroleum Institute) 規格¹⁵⁾ に準じて行い、家庭用ミキサーを使用して水とセメントの混合を行った。

Table 1 Test condition and results.

Test name	Specimens	Roughness of steel R_a (μm) R_z (μm)	w/c (%)	Effective confining pressure (MPa)	Water pressure (MPa)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	push out rate (mm/min)	Maximum friction (MPa)	Secant deformation modulus (MPa/mm)	Residual strength (0.5 mm) (MPa)	Number of test
S-C-01	Steel & Class G cement	1.2	8.4	40	0	10	-	2.45	30.26	0.99	5
S-C-02				45	0	10	-	2.10	23.29	0.98	14
S-C-03				50	0	10	-	2.49	26.18	1.02	4

Fig.4 Schematic of amsler type universal testing machine.

3・2 試験装置と試験条件

試験は300kN アムスラー式万能試験機を用いて行った。その概略図を Fig. 4 に示す。試験の際は供試体を底板に乗せ、鋼棒を押し抜くための空間を作り、載荷は鋼棒上端部に対して行った。アムスラー式万能試験機における載荷速度の制御は手動で行うため、一定の載荷速度に保つのが困難であるが、概ね0.05～0.2mm/min程度で行った。鋼棒に載荷した荷重はロードセルを用いて測定した。鋼棒の変位量はロードセルに接するように設置した変位計により測定し、ロードセルの移動距離を鋼棒の変位量とした。試験条件一覧を Table 1 に示す。本試験には表面粗さを表すパラメータである R_z (最大高さ) が $8.4\mu\text{m}$, R_a (算術平均粗さ) が $1.2\mu\text{m}$ 程度の鋼棒を使用した。セメントの強度と摩擦強度の関係を調べるために、供試体は水セメント比を45%, スラリー比重を1.90に配合したものを基本とし、さらに水セメント比40%と50%の2種類を用意した。

セメントの強度を調べるためには、押し抜き試験用供試体と同じクラスGセメントを用いて作製した供試体に対し、一軸圧縮試験および圧裂引張試験を行った。一軸圧縮試験には直径50mm, 高さ100mmの円柱形供試体を用い、圧裂引張試験には直径50mm, 高さ約30mmの円柱形供試体を用いた。その結果の平均値, および圧縮強度と引張強度から算出したせん断強度を Table 2 に示す。せん断強度の算出は下の式¹⁶⁻¹⁷⁾を用いた。

$$S_s = \frac{S_c \cdot S_t}{2\sqrt{S_t(S_c - 3S_t)}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに, S_s : せん断強度 (MPa), S_c : 圧縮強度 (MPa), S_t : 引張強度 (MPa), である。

3・3 試験結果

鋼棒の貫入量とせん断応力の関係を代表的な結果について Fig. 5 (a) - (c) に示す。図中の白丸は試験のせん断応力の最大値で摩擦強度を示している。いずれの場合も載荷開始とともにせん断応力が直線的に増加し、ピークに達すると急激に緩和する傾向を示した。その後はせん断応力が小さく上下運動を繰り返すスティッ

Table 2 Results of compression test and radial compression test.

Test name	w/c (%)	S_c (MPa)	S_t (MPa)	S_s (MPa)	E_{50} (GPa)	V (-)
C-01	40	31.33	3.77	6.79	10.62	0.21
C-02	45	22.42	3.65	6.32	9.65	0.21
C-03	50	16.90	2.73	4.73	7.89	0.22

Fig.5 Results of push-out test for samples of (a) water-cement ratio 40%, (b) 45% and (c) 50%.

クスリップ現象を示しながらほぼ一定の残留強度に落ち着く傾向を示した。ここで、鋼棒の貫入量5mmにおけるせん断応力を残留強度とすると、それぞれの摩擦強度, 残留強度, ステッキスリップの幅に共通性は見られず、データのばらつきが大きい結果となった。

摩擦強度と水セメント比の関係を Fig. 6 (a) - (c) に示す。参考のため、セメントの一軸圧縮試験および圧裂引張試験の結果も図中に示している。セメントの圧縮強度, 引張り強度, せん断強度は、水セメント比が増加すると強度が弱くなる傾向を示した。摩擦強度に関しては、それぞれの水セメント比において約1.2MPa程度の幅でデータのばらつきが見られる。しかし、最小二乗法を

Fig.6 Relationship between water-cement ratio and maximum friction or (a) compressive strength, (b) tensile strength, (c) shear strength.

用いて示した近似線は一定を示しており、全体の傾向として水セメント比が変化しても摩擦強度に影響を与えない結果となった。摩擦強度はセメントの圧縮、引張り、せん断のいずれの強度よりも小さな値を示していることから、接触面においてセメントそのものの破壊は生じておらず、鋼棒がセメント表面を滑っていると考えられる。従って、本試験における水セメント比の範囲では、水セメント比は摩擦強度には影響を与えないことが示された。

次に、押し抜き試験から得られた変形係数および一軸圧縮試験から得られたヤング率を Fig. 7 に示す。なお、本研究で扱う押し抜き試験の変形係数は、摩擦強度をその時の貫入量で除して算出した値である。変形係数に関しても摩擦強度と同様にデータのばらつきが大きく、同一水セメント比に対しておよそ 20MPa/mm 程度の差が見られる。一見して、水セメント比が増加すると変形係数が減少しているように見える。しかし、データのばらつきが大きいことと、水セメント比 50% において 35MPa/mm 付近に 2 点あることを踏まえると、ほぼ一定と見ることが出来る。よって、水セメント比による変形係数への影響も少ないと言える。

最後に Fig. 8 に摩擦強度および貫入量 0.5mm における残留強

Fig.7 Relationship between water-cement ratio and secant deformation modulus or Young's modulus.

Fig.8 Relationship between water-cement ratio and frictional strength and residual strength.

Fig.9 Schematic of simulated sample.

度を示す。摩擦強度に比べ残留強度はデータのばらつきが小さくなっていることが見て取れる。そして、残留強度も摩擦強度と同様に、本試験における水セメント比の範囲では影響を受けない結果を示した。摩擦強度が水セメント比の影響を受けない原因として、鋼棒の表面粗さが考えられる。本試験に用いた鋼棒の表面粗さは $R_z = 8.4\mu\text{m}$ 程度であり滑らかである。そのため、鋼棒表面の溝にセメントが付着し摩擦力として働くことが少なく、セメントの水セメント比が摩擦強度に影響を及ぼすことがなかったと考えられる。残留強度に関しては接触面剥離後に生じるマイクロニュラス（管状の空間）が原因と考えられる。マイクロニュラスはセメントの水セメント比に関係なく発生するため、残留強度も水セメント比の影響を受けず、ほぼ一定となったと考えられる。

4. 拘束圧および表面粗さの摩擦強度への影響

4・1 供試体の作製

拘束圧負荷条件下における押し抜き試験に使用した供試体の模式図を Fig. 9 に示す。本供試体は中央に設置した中空の鋼棒

(a) Schematic of experimental apparatus for high pressure push-out test

(b) Setup of specimen

1) Outer load cell, 2) Axial displacement transducer, 3) Cell pressure gauge, 4) Cell pressure controller, 5) Refrigerant cooling tank, 6) High-pressure pump, 7) Pressure vessel, 8) Inner load cell, 9) Top cap, 10) Specimen, 11) Steel rod, 12) Rubber membrane, 13) Pedestal, 14) Inner displacement transducer, 15) Pore pressure gauge, 16) Cylinge pump for pore water

Fig.10 Experimental apparatus.

Table 3 Test condition and results.

Test name	Specimens	Roughness of steel R_a (μm) R_z (μm)		w/c (%)	Effective confining pressure (MPa)	Water pressure (MPa)	Temperature (C°)	push out rate (mm/min)	Maximum friction (MPa)	Secant deformation modulus (MPa/mm)	Residual strength (10 mm) (MPa)	Number of test
S-C-04	Steel & Class G cement	0.3	2.7	45	0	0	10	0.1	0.80	4.50	0.15	4
S-C-05					1.5	0	10	0.1	1.63	7.26	0.67	4
S-C-06					3	0	10	0.1	2.42	7.94	0.66	4
S-C-07		2.7	14.7		0	0	10	0.1	2.69	6.25	0.21	4
S-C-08					1.5	0	10	0.1	3.32	7.33	0.74	4
S-C-09					3	0	10	0.1	4.84	6.65	0.83	4
S-C-10		7.0	30.0		0	0	10	0.1	4.89	7.31	0.07	4
S-C-11					1.5	0	10	0.1	6.11	7.05	1.37	4
S-C-12					3	0	10	0.1	6.79	8.39	1.67	4

(直径 30mm, 高さ 128mm) およびセメント (直径 100mm, 高さ 100mm) からできており, セメントは同じくクラス G セメントを用いた。本試験では水セメント比を 45%, スラリー比重を 1.90 に設定した。供試体作製には型枠を使用した。作製手順は, 鋼棒と型枠で形成された空間にセメントスラリーを流し込み, 10°C に設定した恒温室で一日放置する。一日置くとセメントスラリーが固化するので, 型枠を外し水中養生を行う。養生日数は 7 日間とし, 養生の終わった供試体は試験直前に供試体の上面を平面研磨し, 水平に仕上げる。

4・2 試験装置と試験条件

高圧押し抜き装置の概略図を Fig. 10 (a) に示す。装置中央にはベDESTALがあり, 供試体はここに設置される。設置された供試体の上にはトップキャップを載せ, これらをゴムスリーブで覆うことにより供試体内にセル液が浸入するのを防ぐことができる。この装置の最大軸荷重は 200kN, 最大拘束圧 (圧力容器内を循環するセル液の圧力) は 20MPa, 最大背圧 (図中の Pore pressure gauge で測定される間隙水圧) は 20MPa である。供試体の温度はセル内を循環するセル液の温度を制御することにより, ほぼ一定に保つことができる。

押し抜き試験は以下の手順にて行った。まず, ベDESTAL, トップキャップおよび供試体をゴムスリーブで被覆し, Fig. 10 (b) に示すように三軸セル中央部分に設置する。次に, 圧力容器を被せ, セル内にセル液を循環させることにより拘束圧を目標の圧力まで昇圧させる。拘束圧が目標値に達したら, 軸変位制御により鋼棒上端部に対し載荷を行う。軸荷重は内部ロードセル, 軸変位は軸変位計で測定を行った。試験条件を Table 3 に示す。試験は有効拘束圧 0 (大気圧下), 1.5, 3.0MPa とし, それぞれの拘束圧に対して表面粗さ $R_z = 2.7\mu\text{m}$ ($R_a = 0.3\mu\text{m}$), $R_z = 14.7\mu\text{m}$ ($R_a = 2.7\mu\text{m}$) そして $R_z = 30.0\mu\text{m}$ ($R_a = 7.0\mu\text{m}$) の 3 種類の鋼棒を用いた。なお, 生産井に用いられるケーシングの表面粗さは $R_z = 15\mu\text{m}$ 程度である。本試験では, 試験回数をそれぞれ 4 回ずつ行い, 載荷速度は一定 (0.1mm/min) とした。

4・3 試験結果

鋼棒の表面粗さ $R_z = 14.7\mu\text{m}$ におけるせん断応力と鋼棒の変位量の関係を Fig. 11 に示す。ピーク時のせん断応力を摩擦強度, 鋼棒の貫入量 10mm におけるせん断応力を残留強度とする。全体の傾向として, せん断応力の挙動, 摩擦強度, 残留強度の個々のデータのばらつきが大きいことが確認できる。しかし, 共通の

Fig.11 Results of shear stress using steel rod of $R_z = 17.4 \mu\text{m}$ under different effective confining pressures.

Fig.12 Shear stress in effective confining pressure (a) 0MPa (b) 3MPa.

挙動の特徴として、せん断応力はピークに達するまでは線形的に増加し、その後はスティックスリップ現象を示しながら一定の残留強度に落ち着く傾向を示した。そして、摩擦強度及び残留強度は、有効拘束圧の増加とともに高くなる傾向を示した。有効拘束圧の増加は摩擦力を表す式 $F = \mu N$ における N の増加を意味する。よって有効拘束圧が高いほど接触面に作用する力が大きくなり、強い摩擦強度を示す結果となった。また、ピークに達した直後のせん断応力の挙動に関して、拘束圧の有無により明確に異なる傾向を示した。拘束圧が無い状態では、ピーク後に急激な応力緩和が起こり、その後は小さなスティックスリップを繰り返しながら最後まで一定の残留強度を示した。一方、拘束圧を負荷した試験では、ピーク後の急激な応力緩和は見られるものの、その変化は拘束圧無しの時ほどではなく、残留強度はスティックスリップをしながら漸減し、鋼棒の貫入がしばらく進んでから一定になる傾向を示した。このような傾向は他の表面粗さの鋼棒を使用した結果も同様であった。

そこで、異なる表面粗さの鋼棒を使用した拘束圧 0MPa (大気圧下) の結果を Fig. 12 (a) に、有効拘束圧 3MPa における結果を Fig. 12 (b) に示す。なお、結果は各条件から代表的なものを 1 本ずつ示している。Fig. 12 (a) から、鋼棒表面が粗くなるほど摩擦

Fig.13 Result of displacement of steel rod versus roughness of steel rod.

Fig.14 Results of frictional strength under different effective confining stress.

強度が強くなり、破壊に至るまでの変位量が大きくなる傾向が見られた。そして、ピーク後のせん断応力は、ほぼ 0MPa のまま試験終了時まで一定の応力を保つ。これは、拘束圧が無いために接触面の破壊によるマイクロアニュラスが保たれるためと考えられる。そのため、摩擦強度が減少し残留強度が小さくなったと判断される。一方、有効拘束圧 3MPa の結果を示した Fig. 12 (b) からは、鋼棒の表面粗さの増加に伴う摩擦強度および最終的な残留強度の増加が認められた。そして、摩擦挙動についても若干の違いが見られた。 $R_z = 14.7 \mu\text{m}$ および $R_z = 30.0 \mu\text{m}$ の鋼棒を使用した押し抜きでは、線形的なせん断応力の増加とピーク後の急激な応力緩和、その後の残留強度の漸減そして定常という経過を辿るのに対して、 $R_z = 2.7 \mu\text{m}$ の鋼棒を使用した押し抜きではピーク直後の急激な応力緩和が見られず、直ちにスティックスリップを始めた。このような傾向は、 $R_z = 2.7 \mu\text{m}$ 有効拘束圧 1.5MPa, 3.0MPa および $R_z = 14.7 \mu\text{m}$ 有効拘束圧 1.5MPa の条件において多く見られた。

Fig. 13 にせん断応力がピークに達した時の鋼棒の変位量と鋼棒の表面粗さの関係を示す。図から鋼棒の表面粗さが増加するとピークに達するまでの貫入量が増加することが示された。それぞれの拘束圧において $R_z = 30.0 \mu\text{m}$ の鋼棒では $R_z = 2.7 \mu\text{m}$ の鋼棒のおよそ 3 倍の距離を持ち堪えることができた。

Fig. 14 に摩擦強度と有効拘束圧の関係を示す。また、図中にはセメントの一軸圧縮試験および圧裂引張試験の結果を用いて描いたモールの応力円および破壊包絡線も示す。圧裂引張試験では、供試体の中心部において引張応力の 3 倍の大きさの圧縮応力が作用していることが知られている¹⁸⁾。従って、図中には引張応力の 3 倍の値の圧縮応力を含めた応力円も描いた。そして、圧縮応

Fig.15 Results of residual strength under different effective confining stress.

力から描いた応力円との共通接線を包絡線とした。なお本図では、内部摩擦角と有効摩擦角を同軸上で扱っている。それぞれの表面粗さにおける摩擦強度は有効拘束圧の増加に伴い増加する傾向を示した。また、鋼棒の表面が粗いほど高い値を示し、 $R_z = 30.0\mu\text{m}$ の鋼棒では $R_z = 2.7\mu\text{m}$ の鋼棒のおよそ 3 倍程度の強度を示した。 $R_z = 2.7\mu\text{m}$ の鋼棒を使用した際の有効拘束圧に対する摩擦強度 (τ_{max} , MPa) は実験値を最小二乗法を用いて式 (2) で直線近似することにより次式 (3) - (5) で示される。

$$\tau = c' + \sigma' \tan \delta' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 τ : せん断応力 (MPa), c' , δ' : 材料同士の付着力 (MPa) と有効摩擦角 ($^\circ$), σ' : 供試体に負荷する有効拘束圧 (MPa) である。

$$\tau_{\text{max}} = 0.79 + \sigma' \tan 29^\circ \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、 $R_z = 14.7\mu\text{m}$ と $R_z = 30.0\mu\text{m}$ に対する摩擦強度はそれぞれ

$$\tau_{\text{max}} = 2.54 + \sigma' \tan 36^\circ \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_{\text{max}} = 4.70 + \sigma' \tan 33^\circ \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表される。

ここに、 τ_{max} : 摩擦強度 (MPa), σ' : 有効拘束圧 (MPa) である。本試験結果より、クラス G セメントとケーシングの接触面の摩擦角はおおむね等しく、付着力に依存することが明らかになった。ここで、摩擦強度の有効摩擦角と破壊包絡線の傾きを比べてみる。有効摩擦角の平均値は 33° であり、セメントの内部摩擦角である 31° に近い値を示している。摩擦強度は鋼棒の表面が粗くなるほど破壊包絡線に近づいてくるが、本試験に用いた表面粗さ内では、摩擦強度が破壊包絡線上にまで達することはなかった。仮に、鋼棒の表面粗さをさらに粗くしても、セメントの破壊が先に生じるため、摩擦強度がセメントのせん断強度を超えることは無く破壊包絡線に収束すると考えられる。

次に、残留強度と有効拘束圧の関係を Fig. 15 に示す。摩擦強度と同様に、データにばらつきがあるものの全体として残留強度も有効拘束圧に依存して増加する傾向を示し、特に $R_z = 30.0\mu\text{m}$ の鋼棒ではその傾向が顕著であった。 $R_z = 30.0\mu\text{m}$ が特に顕著な増加傾向を示した原因として、鋼棒表面の凹凸に入り込んだセメントの小さな破壊が考えられる。鋼棒の表面が粗い分、その溝に入り込んだセメントに細かい破壊が生じ、それが新たな摩擦力を生み出していると推察される。試験後の接触面を観察すると、 $R_z = 30.0\mu\text{m}$ の鋼棒を使用したものでは、接触面におけるセメント

Fig.16 Results of frictional strength under different roughness of steel rod.

Fig.17 Relationship between cohesion and roughness of steel rod.

表面にザラザラとした粉状のものが多く生じており、鋼棒表面にもセメントが付着していた。一方、 $R_z = 2.7\mu\text{m}$ と $R_z = 14.7\mu\text{m}$ ではセメント表面は滑らかで粉状のセメントも少なく、鋼棒表面にもセメントの付着は少なかった。

摩擦強度と鋼棒の表面粗さの関係を Fig. 16 に示す。それぞれの表面粗さにおける摩擦強度は鋼棒の表面粗さが粗くなるほど線形的に増加する傾向を示した。鋼棒の表面粗さが粗くなると表面の凹凸が大きくなる。供試体を作製する際、その鋼棒表面の溝の部分にセメントスラリーが入り込み、その後、セメントが楔のように引っ掛かり摩擦力が増加することから、鋼棒の表面粗さに依存して摩擦強度が高くなったと考えられる。

ここで、摩擦強度に関する (3) - (5) の式をまとめると、付着力は表面粗さの関数として Fig. 17 に示すように最小二乗法を用いて直線近似することができ、次式によって表される。

$$c' = aR_z \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 a : R_z の増加に伴う付着力の増分 (MPa/ μm) である。また、有効摩擦角については、ほぼ近い値であるため一定と見なすことができ、この値はセメントの破壊線の傾きとほぼ同じであるため $\delta' = 31^\circ$ とする。従って、摩擦強度は有効拘束圧および表面粗さの関数として次式によって表される。

$$\tau_{\text{max}} = aR_z + \sigma' \tan \delta' \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 σ' : 有効拘束圧 (MPa), δ' : 有効摩擦角 ($^\circ$) である。なお、本研究で用いたクラス G セメントについては、 $a = 0.156 \text{ MPa}/\mu\text{m}$ となった。

5. ま と め

MH層からメタンガスを生産する際、生産井と地層との摩擦強度を把握することは、生産井の健全性の評価する上で重要である。本研究では、生産井のケーシングセメント間を模擬した異種材料による供試体の押し抜き試験を行い、生産井の表面粗さ、セメントの水セメント比が接触面の摩擦強度および残留強度に及ぼす影響について調べた。また、同時にセメントの一軸圧縮試験および圧裂引張試験を行い、セメントの強度と接触面強度の関係についても調べた。主な結果を以下にまとめる。

- (1) 鋼棒の押し抜きの際のせん断応力の挙動は、載荷開始と共に始まる線形的な応力の増加、応力がピークに達した後の応力緩和そしてスティックスリップ現象の3つのステージを経て残留応力が一定に落ち着く傾向を示す。
- (2) 本研究で扱った水セメント比の範囲内では、水はセメントの強度に影響を与え、水セメント比が増加すると強度が低下するが、鋼棒セメント間の摩擦強度、変形係数および残留強度に及ぼす影響は無視できる。
- (3) 鋼棒セメント間のせん断応力がピークに至るまでの貫入量は有効拘束圧および鋼棒の表面粗さに依存し、有効拘束圧および表面粗さが増加すると貫入量も増加する傾向を示す。
- (4) 有効拘束圧および鋼棒の表面粗さは摩擦強度および残留強度に影響を与え、有効拘束圧または表面粗さが増加すると摩擦強度、残留強度共に増加する傾向を示す。
- (5) 鋼棒セメント間の摩擦強度はセメントのせん断強度よりも弱い事が明らかとなり、これらの実験結果から、ケーシングセメント間の摩擦強度に関する式を示した。

本研究により、MH生産井におけるケーシングセメント間の摩擦強度の推定が可能となった。生産井の健全性を評価する際には、シミュレーションに用いるデータのの一つとして、これらの成果が生かされると考える。しかし、生産井と地層との接触面は、ケーシング砂（または泥）、セメント砂（または泥）などが残っており、いる。今後も引き続き押し抜き試験を実施し、残りのこれらの接触面に関しても摩擦特性や摩擦強度について調べる必要がある。

謝辞 本研究は、経済産業省委託研究「メタンハイドレート資源開発・生産手法開発」によるものである。ここに付記して謝意を表す。本研究の実施に当たり、独立行政法人産業技術総合

研究所メタンハイドレート研究センターテクニカルスタッフ大野孝雄氏、株式会社日本アクシス長瀬茂紀氏には、室内実験の実施において多大なるご協力を頂いた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

記 号 一 覧

a	: Rz の増加に伴う付着力の増分, MPa/m
c'	: 付着力, MPa
E_{50}	: ヤング率, GPa
R_a	: 鋼棒の表面の算術平均粗さ, μm
R_z	: 鋼棒の表面の最大高さ, μm
S_c	: 圧縮強度, MPa
S_s	: せん断強度, MPa
S_t	: 引張強度, MPa
w/c	: 水セメント比
δ'	: 有効摩擦角, $^\circ$
τ	: せん断応力, MPa
$\tau_{\max}$	: 摩擦強度, MPa
ν	: ボアソン比
σ'	: 有効拘束圧, MPa

References

- 1) Y. Okuda: *Petrotech*, **16** (1993), 300-305.
- 2) M. Sato et al.: *J. Jpn. Inst. Energy*, **80** (2001), 973-995.
- 3) M. Sato: *J. Jpn. Inst. Energy*, **80** (2001), 1064-1074.
- 4) M. Kurihara et al.: *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **74** (2009), 311-324.
- 5) K. Yamamoto: *Journal of Geography*, **118** (2009), 913-934.
- 6) S. Kimoto et al.: *Computers and Geotechnics*, **34** (2007), 216-228.
- 7) A. Klar et al.: *Geotechnique*, **60** (2010), 765-776.
- 8) J. Yoneda et al.: *Frontiers in Offshore Geotechnics II*, (Taylor & Francis Group, London, 2011), pp. 245-250.
- 9) H. Matsukawa: *J. Surface Sci. Soc. Jpn.*, **24** (2003), 328-333.
- 10) K. Matsuzawa: *Concrete Research and Technology*, **30**(2008), 1141-1146.
- 11) Y. Jinnai and N. Morita: *Drilling & Completion* (2009), pp. 332-345.
- 12) Z. Boskovic et al.: *TTEM*, **5** (2010), 450-454.
- 13) V. Cebasek et al.: *TTEM*, **5** (2010), 840-846.
- 14) S. Naganawa: *Sekiyukaihatsujihou*, **158** (2008), 43-50.
- 15) ISO 10426-2 (2003) ISO 10426-2 (2005)/FDMA 1 (2005). "ANS/API Recommended Practice 10B-2," Recommended Practice for Testing Well Cements.
- 16) U. Yamaguchi and Y. Nishimatsu: *Gansekai Rikigaku Nyuumon*, (Tokyo Daigaku Syuppankai, Tokyo, 1994), pp. 144.
- 17) R. Kobayashi and K. Okumura: *Nihonkougyoukaishi*, **87** (1971), 407-412.
- 18) U. Yamaguchi and Y. Nishimatsu: *Gansekai Rikigaku Nyuumon*, (Tokyo Daigaku Syuppankai, Tokyo, 1994), pp. 136-138.