山口大学大学院	学生会員	○米田純		
山口大学大学院	正会員	兵動正幸	中田幸男	吉本憲正
産業技術総合研究所	〒 非会員	海老沼孝郎		

1. まえがき 日本近海の南海トラフにおいて, 次世代エネルギー 資源として期待されているメタンハイドレート(以下 MH と略す) が多く貯留していることが知られている¹⁾. 図-1 に MH の開発概 念図を示す. 開発が予定されている東海沖, 第二渥美海丘で行わ れた基礎試錐では、MH が堆積している地盤は図に示すように上方 に向かって粗い粒子から細かい粒子へ連続的に移行する級化層理 が発達した堆積土が何百枚も積み重なるタービダイトと呼ばれる 地層であることが分かっている². また, MH はその砂層部分の間 隙に胚胎していることが明らかとなっており、天然ガスの掘削技 術がそのまま適用できない. これまでの研究より³⁾, MH は温度水 圧に依存した固結力を発揮することが知られており、開発時の地盤 の変形挙動を評価するためには MH により固結した砂層と、泥層 の両方の応力ひずみ関係を評価できる構成式が必要となっている. 本研究では MH の固結力を表現できる時間依存性・弾塑性構成式を 提案し、MH により固結した砂の応力ひずみ関係を表現可能とする ことを目的とし、同一の構成式の泥層への適用についても検討を行 った.

<u>2.構成式の概要</u>

<u>2.1</u>構成式の基本的特徴</u>提案する構成式は修正 Cam-clay モデルを基本とし、塑性ひずみ増分を規定する構成関係は関連流れ則を適用したものである.また、MHの固結力を等方引張り応力成分 p_{int} として導入している. p_{int} の大きさは温度水圧条件とMH安定境界の関係を与える状態パラメーター L^4 によって規定され、未固結土の場合は $p_{int}=0$ として与えられる.また、降伏曲面内の塑性変形を考



図-2 本構成式の降伏曲面の概念

慮するために橋口ら⁵が提案している下負荷面モデルを適用する. 図-2 に本構成式の概念を平均有効主応力 p'と軸差応力 q の空間に示す. 下負荷面は正規降伏曲面との相似比 Rを用いて次式で表される.

$$\left(p'+R\cdot p_{\text{int}}\right)\left[1+\left\{\frac{q}{M\left(p'+R\cdot p_{\text{int}}\right)}\right\}^{2}\right]=R\left(p_{0}'+p_{\text{int}}\right)$$
(1)

ここに、 M, p_0 'はそれぞれ MH により固結した堆積土の限界応力比、先行圧密応力を示す.また、図-2 中の p_0 *'は、未固結土の先行圧密応力を示す.

<u>2.2 応力-ひずみの増分関係</u> ひずみ増分と応力増分の関係を考える.体積ひずみ増分 de,と軸差ひずみ増分 deは弾性成分と非弾性成分である塑性成分とクリープ成分の線形和で与えられると仮定すると,式(2)の関係が得られる.

$$d\varepsilon_{v} = \frac{1}{K}dp' + \Lambda \frac{\partial f}{\partial p'} + \Lambda_{c} \frac{\partial f_{c}}{\partial p}dt \quad ; \quad d\varepsilon = \frac{1}{3G}dq + \Lambda \frac{\partial f}{\partial q} + \Lambda_{c} \frac{\partial f_{c}}{\partial q}dt \quad (2) \quad \Lambda_{c} = D_{v0}^{c} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{v}^{c} + \varepsilon_{v}^{p}}{\alpha}\right) \left(\sqrt{\left(\frac{\partial f_{c}}{\partial p}\right)^{2} + \left(\frac{\partial f_{c}}{\partial q}\right)^{2}}\right) \quad (3)$$

ここに、*dɛ*, *dɛ*共に右辺第一項は弾性成分、右辺第二項は非時間依存の塑性成分、右辺第三項は時間依存の塑性成分を表 す.また、式中の K は体積弾性係数、G はせん断剛性率、A は下負荷面式 f に関連した比例係数である。A_cは後述するクリ ープポテンシャル面 f_cに関連した比例係数であり式(3)で表される⁹.*dt* は時間増分、*d*は2 次圧密係数、D_w^o はクリープ体積 ひずみ増分の初期値である。ここでは、MH が持つ時間依存性⁷⁷を表すために橋口ら⁹⁰の提案する時間依存性モデルの考え方 を適用している。クリープポテンシャル関数 f_cは下負荷面のそれと等しいと仮定し、式(1)中の*M*をクリープポテンシャル面 の大きさを表すパラメーター*m*_cとすることで表現している。

<u>2.3 内部応力の発展則</u> MH の固結力は非弾性成分による仕事と生産時に起こる温度および水圧変化によって様々に変化 する.これを表現するために内部応力 *p*_{int}の発展則を以下の式で表している.

$$dp_{\rm int} = \frac{\partial p_{\rm int}}{\partial S_{pc}} dS_{pc} + \zeta e^{-\chi S_{pc}} \left(\frac{\partial L}{\partial T} dT + \frac{\partial L}{\partial P} dP\right) \qquad (4) \qquad S_{pc} = \Lambda \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial p'}\right)^2 + M^2 \left(\frac{\partial f}{\partial q}\right)^2} + \Lambda_c \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial p'}\right)^2 + m_c^2 \left(\frac{\partial f_c}{\partial q}\right)^2} \tag{5}$$

ここに、*L* は温度、水圧条件と MH 安定境界の関係を与える状態パラメーター、 ζ は*L* の変動に伴う初期内部応力の変化 の程度、 χ は内部応力の損傷の程度を規定する材料定数である.**式**(4)の右辺第一項は**式**(5)で表される非弾性成分の内部仕事 に関連した正規化仕事量 *S_{pc}*による固結力の損傷を表している.具体的にはこの仕事量の右辺第一項は塑性成分、第二項はク リープ成分を表している.**式**(4)右辺第二項は状態パラメーター*L* の変化、つまり温度水圧の変化による固結力の損傷を表し ている.以上より、非弾性成分による内部仕事と温度水圧変化による固結力の損傷を表現している.

3. **州固結砂の排水三軸圧縮試験** 実験結果との比較を行うために, 宮崎 ら⁷⁾による未固結土(豊浦砂)と MH 固結土の排水三軸圧縮試験結果を 提案した構成式を用いてシミュレーションした結果を図-3 に示す. 表-1 に示した解析パラメーターは未固結土の等方圧縮徐荷試験および等方圧 縮クリープ試験, 未固結土と MH 固結土の排水三軸圧縮試験結果, およ び, それらに対するフィッティングにより求めている. 図より, この構成 式により, MH の固結による初期剛性, ピーク強度の増加が表現可能なこ とがわかる. これは内部応力 *p*_{int}を導入したことによるものである. また, 実験結果よりひずみレベルが大きくなるに連れ MH 固結土の軸差応力は 未固結土のそれに漸近していることがわかる. これは, ひずみの進行とと もに MH の固結力が損傷しているためである. 解析においては式(5)で表 される *S*_{pe}がひずみの進行とともに増加し, 式(4)の *d*_{pint}を減少させること で表現されることによる. ひずみ速度の違いについて注目すると, 未固結 土に対して固結土が時間依存性を顕著に示している実験値に対して, 解析 結果が同様の傾向を表現可能なことがわかる. これは,

下負荷面の広がりの速度を表すパラメータールによる ものである.なお本研究ではルはMHの固結力の損傷に よらず一定であると仮定している.

4. 粘性土への適用 泥層への適用を検討するため, 平成11年に南海トラフ(東海沖)で採取された不撹乱 試料の非排水条件下のK₀圧密三軸圧縮試験結果を,提 案した構成式を用いてシミュレーションを行う. 採取 された試料の粒度分布と物性値は図-4 に示す通りで あり, CH に分類される土である. 図中には3. で用 いた豊浦砂も合わせて示す. 提案の構成式は p_{int}=0 と することで修正 Cam-clay モデルに下負荷面, 関連流れ 則に基づいたクリープポテンシャル面を適用した形に



(実験結果は宮崎ら⁷⁾より引用)

表-1 解析パラメーターの詳細

記문	詳細	値	
40.2	14 T 1754	MH固結土	未固結土
л	e-Inp' 空間における正規圧密曲線の傾き	0.146	
к	e-Inp' 空間における過圧密曲線の傾き	0.0016	
p _i	初期有効平均応力	月有効平均応力 1.2 (MPa)	
e,	初期有効平均応力 ρ _/ 時の間隙比	0.9	73
М	限界応力比	0.	9
m _c	クリープポテンシャル面の最大軸差応力時の応力比	0.9	
u	塑性ひずみ増分の大きさを規定	4	D
β	内部応力の変動に伴う <i>p。</i> 'の変化の程度を規定		-
γ			-
χ	内部応力の損傷の程度を規定	20	-
ζ	温度、水圧の変動に伴う初期内部応力の変化の程度を規定	0.1	-
α	二次圧密係数	4×10 ⁻⁴	
D_{v0}^{c}	クリープひずみ増分の初期値	-2×10	⁷ min ⁻¹
ν	ひずみ増分の大きさに関連した塑性ひずみ増分の大きさを規定	5000	1000





帰着する. 表-2 に示した解析パラメーターん, K, pi, eiは不撹乱試料 を再構成し、圧密試験を行った結果より算出した. M, m_cは非排水 条件下のKo圧密三軸圧縮試験結果の軸ひずみ15%のときの応力比と した. u, α, D_{u0}^{c}, u は経験に基づくフィッティングパラメーターとし て取り扱った. 応力ひずみ関係を図-5 に、有効応力経路を図-6 に示 す. 図より, 不撹乱試料が過圧密における正のダイレイタンシーと その後のひずみ軟化挙動を示していることがわかる. これは、海底 面の侵食やボーリング時の試料の乱れからと推察される. シミュレ ーションにおいても過圧密状態として解析を行った.実験結果に比 べ解析結果の初期剛性が低くなっていることがわかる.これは、実 験結果に比べ解析の負のダイレイタンシーが大きく出ているためで ある. その後, 限界状態線を越えてダイレイタンシーが負から正へ 移行する挙動はうまく表現されている. 実験結果にみられるピーク 発生後のひずみ軟化挙動の再現までには至らなかった. しかしなが ら、この過圧密粘土の挙動は、採取された不撹乱試料がかなりの深 度のものであるため、時間効果によるセメンテーションによるもの とも考えられる.これは、先にあげた pintを過圧密粘土に対しても適 用することで表現できる可能性があり、現在検討中である.

<u>5.</u> まとめ 本研究では MH の固結力を表現可能な時間依存性・弾 塑性構成式を提案することで時間に依存した MH 固結砂の応力ひず

表-2 解析パラメーター

記号	値	記号	值
λ	0.102	m _c	1.36
к	0.024	и	100
p,	1.0 MPa	α	0.008
e,	1.0	D v0 c	-2×10 ⁻⁵ min ⁻¹
М	1.36	ν	1000



図-6 泥層から採取された不撹乱土の有効応力経路

み関係を表現可能とした. また, 提案の構成式中の *p_{int}=*0 とすることで粘土への適用が可能であることが示唆された. [謝辞]本研究は、経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業・生産手法開発に関する研究開発」の一部として実施された. 記して謝意を表する次第である. [参考文献]1)メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 天然試料の物性と生産手法、平成 16 年度成果報告会資料, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 天然試料の物性と生産手法、平成 16 年度成果報告会資料, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 天然試料の物性と生産手法、平成 16 年度成果報告会資料, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 天然試料の物性と生産手法、平成 16 年度成果報告会資料, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 天然試料の物性と生産手法、平成 16 年度成果報告会資料, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 天然試料の物性と生産手法、平成 16 年度成果報告会資料, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 天然試料の物性と生産手法、平成 16 年度成果報告会資料, <u>http://www.mh21japan.gr.jp/</u>. 2)成田英夫 - メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム - , 年表記書表示, 中田幸男, 吉本憲正, 香月大輔,海老沼孝郎: 内部応力の項を導入したメタンハイドレート混合土の弾塑性構成モデルの提案、第 39 回地盤工学研 完発表会、pp. 375-376, 2004. 5) Hashiguchi, K. and Ueno, M.: Plastic constitutive law of granular materials, Constitutive equations of soils, JSSMFE, Tokyo, pp.73-82, 1977. 6) Hashiguchi, K. and Takashi, O: Time-dependent elastoplastic constitutive equation based on the subloading surface model and its application to soils, Soils and Foundations, Vol.40, No. 4, pp.19-36, Aug 2000. 7) 宮崎晋行, 桝井明,坂本靖英,羽田博憲,緒方雄二,青木一男,山口勉,大久保誠介:メタンハイドレートを含む模擬堆積 物の三軸圧縮特性におよぼすひずみ速度の影響、資源・素材学会誌 Journal of MMIJ, Vol.123, pp.537-544, 2007.