

メタンハイドレート混合土の弾塑性構成モデルの提案

山口大学大学院 学生会員○武富一樹 古屋敷龍成

山口大学工学部 正会員 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正

1. まえがき

近年に行われたメタンハイドレート（以下 MH と略す）層を対象とした基礎試験や生産テストにより、MH の結晶が堆積土の間隙を埋めるように存在していることが明らかになった。また、MH の存在により土粒子間を固結させる機能を果たしていることも明らかとなった。実際に MH を生産する上で MH の分解による土粒子間の固結力の消失に伴う地盤の変形挙動が問題点として考えられる。本報告では、このような固結力に着目し、MH を含む土の力学挙動を表現可能な構成モデルの提案を目的とした検討を行った。

2. 構成モデルの概要

2.1 提案式の基本的特性

ここで固結作用に伴う力学特性の変化を表現するため、等方的な内部応力成分 p_{int} を導入する。これは、固結作用により土粒子間に作用すると考えられる内部拘束作用を平均主応力成分に換算したものである。また、先行圧密応力以下の応力レベルでも塑性変形挙動を表現するため、橋口ら¹⁾の提案している下負荷面モデルを適用する。提案式の主な特徴をまとめる。①修正 Cam-clay モデルを基本とする。②塑性ひずみ増分を定義する構成関係は、関連流れ則に基づいて導かれる。③固結作用を平均有効主応力成分 p_{int} として導入し、 $p_{int} > 0$ であれば MH を含む土の構成モデルとなり、 $p_{int} = 0$ であれば土のみの構成モデルとなる。④降伏曲面内での弾塑性変形挙動を表現するため、下負荷面モデルを適用する。

2.2 降伏関数

修正 Cam-clay モデルを基本とし、 p_{int} を導入することで降伏関数、

$$(p' + p_{int})^2 - (p_0' + p_{int})(p' + p_{int}) + \left(\frac{q}{M}\right)^2 = 0 \quad (1)$$

を得る。 $p_{int} = 0$ の時、つまり MH の存在がなければ、式 (1) は修正 Cam-Clay モデルにおける未固結状態の降伏関数に帰着する²⁾。また、 $p_0^{*'}と p_0' の関係を α 、 β を用い次式で仮定する。$

$$p_0' = \exp \left\{ \ln p_0^{*'} + \frac{p_{int}}{(\alpha + \beta \times p_{int})(\lambda - \kappa)} \right\} \quad (2)$$

α 、 β は $p_0^{*'}$ と p_0' の関連を表す係数である。ここに、 $p_0^{*'}$ は土のみの圧縮降伏応力、 p_0' は MH 混合土の圧縮降伏応力である。

2.3 内部応力 p_{int} の損傷を定義する発展則 dp_{int}

既往の固結粘土のモデル³⁾において提案されたものに倣い、内部消散エネルギー式として次式を仮定する。

$$dW_{in} = (p' + p_{int}) \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (M \times d\varepsilon^p)^2} - p_{int} \times d\varepsilon_v^p \quad (3)$$

エネルギーが消散される要因の一つとして塑性変形、つまり固結構造の損傷が考えられる。内部応力 p_{int} の損傷を定義する発展則 dp_{int} が満足しなければならない条件を示すと、① $p_{int} = 0$ のとき $dp_{int} = 0$ 、② $d\varepsilon_v^p \neq 0$ のとき $dp_{int} < 0$ 、③ $d\varepsilon^p \neq 0$ のとき $dp_{int} < 0$ である。これらを満足し、かつ仕事量とを関連付ける以下の dp_{int} の式を仮定する。

$$dp_{int} = -\chi \times p_{int} \times \Lambda \left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial p'} \right)^2 + M^2 \left(\frac{\partial f}{\partial q} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで χ は内部応力の損傷の程度を規定する係数、 Λ は塑性ひずみ増分の大きさを決定する比例定数である。

3. パラメータの決定方法と構成方程式の簡単な検証

3.1 初期内部応力 p_{int0} の決定方法

初期内部応力 p_{int0} の有する特徴は、①温度・圧力条件によって変化、②温度・圧力条件が安定境界外であれば $p_{int0} = 0$ である。これらを表現するには、MH の温度・拘束圧（静水圧）依存度を考慮する必要があると考える。そこで、MH の温度拘束圧依存度を整理し、MH の性質を力学的な見解から考察する指標として状態パラメータ L を定義する。これは温度・拘束圧条件と MH の安定境界との関係を示すものである。そこで、図-1 に安定境界と温度・拘束圧条件との関係 L_T ($T(P) \cdot T$; 安定境界との温度差)、 L_P ($P(T)$; 安定境界との拘束圧差) を示す。 $T(P)$ は拘束圧 P のときの安定境界温度、 $P(T)$ は温度 T のときの安定境界圧力をそれぞれ示している。図より、近似線は化学的な試験よ

り得られた安定境界を精度良く表現できていることが認められる。簡単のため状態パラメータ L を次式のように定義する。

$$L = a \times L_T + L_P \quad (5)$$

ここに a は温度変化による安定度を圧力による安定度に転換するパラメータで $1(\text{MPa}/^\circ\text{C})$ である。式 (5) より算出した L と強度の関係を図-2 に示す。図より、温度・拘束圧条件と強度には良い相関関係が認められる。この状態パラメータ L を用い p_{int0} を次式で示す。

$$p_{int0} = \zeta \times L \quad (6)$$

ここで、 ζ は L により表現された温度・拘束圧依存度を p_{int0} に変換するための係数である。さらに、MH 生産時の温度・拘束圧の変化に伴う内部応力の変化も式 (6) を基にして式 (4) に組み込むことで表現できると考える。また、本構成モデルに必要なパラメータは、 $p_i, e_i, \lambda, \kappa, M, u, \alpha, \beta, \chi$ 及び ζ の全部で 10 個である。詳細については表-1 に示す通りである。

3.2 試験結果との対応

本年度より導入した三軸試験装置による豊浦砂の三軸圧縮試験結果及び他機関による MH 混合砂の三軸圧縮試験結果を、提案した構成モデルにより予測しその適用性を検討する。表-2 に予想に用いたパラメータを

示す。図-3、図-4 に 2 種類の試料を用いた三軸圧縮試験結果並びに予測結果を示している。図より、砂試料においては、高压条件で顕著となる明確なピークの消失する応力ひずみ挙動、負のダイレイタンス挙動を共にうまく表現できていることが認められる。また、MH 混合砂試料においては固結力による明確なピークの発現、またそれに伴う正のダイレイタンス挙動をうまく表現できていることが認められる。

4. まとめ

提案式は、固結砂、未固結砂両者の応力ひずみ挙動を全体的にうまく表現できた。10 個のパラメータを適切に決定できれば、生産に伴う温度・圧力変化をも表現し得るモデルとなることが示唆される。

【参考文献】 1) 橋口公一：弾塑性構成方程式 基礎理論および最近の主要な成果の整理、福岡市、2000 2) 香月大輔、中田幸男、兵動正幸、村田秀一：固結構造の損傷を評価した固結土の弾塑性構成式、第 39 回地盤工学研究発表会、2004 3) K. Kasama, H. Ochiai and N. Yasufuku: On the Stress-Strain Behaviour of Lightly Cemented Clay Based on an Extended Critical State Concept, 地盤工学会論文報告集 (第 40 巻 第 5 号), pp.37-47, 2000

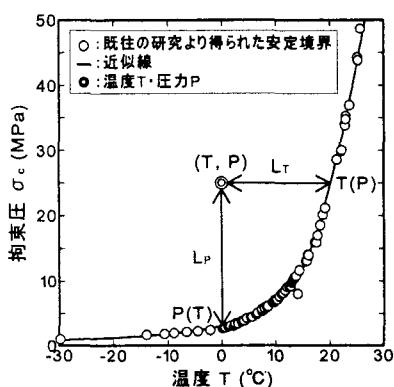


図-1: 安定境界と L_T, L_P

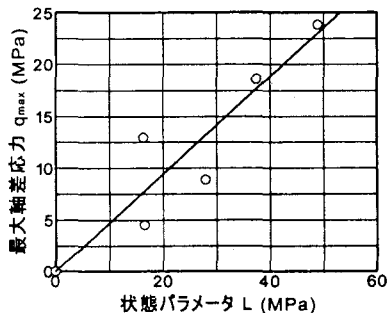


図-2: 最大軸差応力・状態パラメータ L 関係

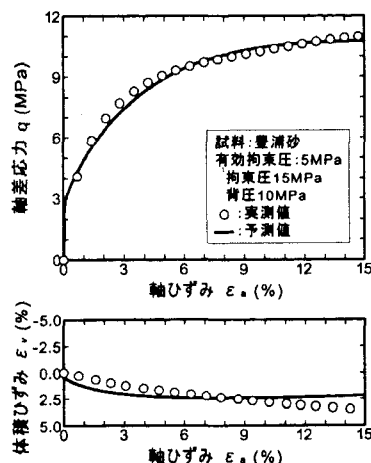


図-3: 検証結果 (豊浦砂)

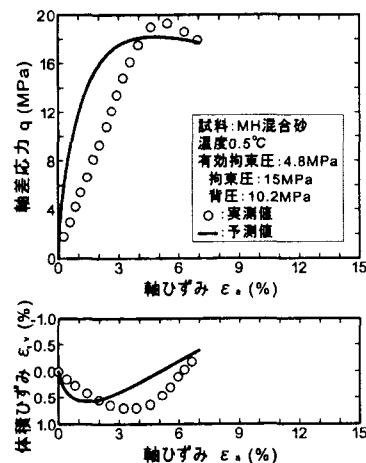


図-4: 検証結果 (MH 混合砂)

表-1: パラメータとその評価

記号	詳細
p_i	基準応力
e_i	基準応力時の間隙比
λ	圧縮指数 (載荷時の $e-\ln p$ 曲線の傾き)
κ	膨潤指数 (除荷時の $e-\ln p$ 曲線の傾き)
M	限界応力比
u	塑性ひずみ増分の大きさを規定
α	内部応力の変動に伴う p_o の変化の程度を規定
β	内部応力の損傷の程度を規定
χ	温度・圧力の変動に伴う初期内部応力の衰化の程度を規定
ζ	

表-2: 用いたパラメータ

	豊浦砂	MH混合砂
p_i	1.2	
e_i	0.973	
λ	0.1459	
κ	0.0016	
M	1.2	
u	10	
α		4
β		4
χ		1
ζ		0.1