

非関連流れ則を適用したメタンハイドレート胚胎土の弾塑性構成モデル

山口大学大学院 学生会員 ○中島晃司

山口大学大学院 正会員 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正

1. はじめに

東部南海トラフの海底地盤に存在するメタンハイドレート(以下MH)が、天然ガス資源として注目を浴びており研究開発が進められている。MHを安全に生産するためには、MH堆積層の力学特性を精度良く表現できる構成モデルが必要となる。MHが賦存する海底堆積層は砂泥互層であるため、砂質土から粘性土まで幅広い粒度で構成されていることが知られている。そのため、応力状態と塑性ひずみ増分を関連付ける流れ則の評価が重要となる。本研究では、非関連流れ則を適用した弾塑性構成モデルの構築を試み、実地盤の粒度で作製されたMH胚胎土の三軸圧縮試験より得られた応力ひずみ関係²⁾に対して構成モデルの適用性を検討する。

2. 非関連流れ則を適用した弾塑性構成モデル

2.1 弾塑性構成モデルの基本的特徴

用いる構成モデルの基本は、弾塑性モデルとして代表的な修正Cam-clayモデルを取り上げ、MHのセメンテーション力による強度増加を平均有効主応力成分である内部応力 p_{int} を導入することで表現する。また、降伏曲面内の塑性変形を考慮して橋口³⁾が提案する下負荷面モデルを適用する。

2.2 応力増分とひずみ増分の関係

応力成分 p' および q に対するひずみ増分を $d\varepsilon_v$ および $d\varepsilon$ とし、全ひずみ増分は、弾性成分と塑性成分の線形和で与えられるとする。材料がHooke弾性体であるとする、弾性体積ひずみ増分および弾性軸差ひずみ増分は、体積弾性係数 K 、せん断弾性係数 G を用いることで、式(1)および式(2)のように表される。

$$d\varepsilon_v^e = \frac{1}{K} dp' \quad (1) \quad d\varepsilon^e = \frac{1}{3G} dq \quad (2)$$

また、非関連流れ則を仮定すると、塑性体積ひずみ増分と塑性軸差ひずみ増分は、式(3)および式(4)で表される。

$$d\varepsilon_v^p = A \frac{\partial g}{\partial p'} \quad (3) \quad d\varepsilon^p = A \frac{\partial g}{\partial q} \quad (4)$$

A は塑性ポテンシャル関数に関連した比例定数である。

2.3 塑性ポテンシャル関数

塑性ポテンシャル関数は、式(5)に示すKasama et al.⁴⁾が提案するストレスダイレイタンシー関係式に直行則を適用し、積分することで式(6)のように求まる。

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon^p} = \frac{M^2 - \eta^{*2}}{c\eta^*} \quad (5)$$

$$g = \frac{c}{2(c-1)} \ln(M^2 + \eta^{*2}) + \ln(p' + p_{int}) = const. \quad (6)$$

ここで、 η^* は実質応力比として式(7)で与えられる。

$$\eta^* = \frac{q}{p' + p_{int}} \quad (7)$$

式(5)中のパラメータ c は、塑性ポテンシャルの形状を規定し、ダイレイタンシー特性を評価するパラメータである。また、 M はMHを含まない砂の塑性ひずみ増分比 $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon^p=0$ のときの応力比とする。

2.4 降伏関数

Yasufuku et al.⁵⁾が提案する等方硬化型構成式の降伏曲面の勾配を与える式を実質応力比 η^* により拡張すると式(8)のようになり、積分することで式(9)に示すMH胚胎土の降伏関数が求められる。

$$\frac{dq}{dp'} = \frac{\eta^{*2} - N^2}{d\eta^*} \quad (8)$$

$$F = (p' + p_{int})^2 - (p' + p_{int}) \left\{ \frac{p_0' + p_{int}}{p' + p_{int}} \right\}^{\frac{2(d-1)}{d}} + \frac{d-1}{N^2} q^2 = 0 \quad (9)$$

ここで、 N は降伏曲面の勾配が0となる応力比、 d は降伏曲面の形状を規定するパラメータである。 N はMHを含まない砂の応力経路試験から求められることが明らかとなっており⁶⁾、今後検討を行っていく予定である。本研究では、 N および d はフィッティングパラメータとして与える。

2.5 下負荷面関数

下負荷面の降伏関数は式(10)で与えられる。

$$f = (p' + R p_{int})^2 - (p' + R p_{int}) \left\{ \frac{R(p_0' + p_{int})}{p' + R p_{int}} \right\}^{\frac{2(d-1)}{d}} + \frac{(d-1)}{N^2} q^2 = 0 \quad (10)$$

キーワード メタンハイドレート 弾塑性構成モデル 非関連流れ則

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 TEL 0836-85-9344

式中 R は正規降伏曲面に対する下負荷面の相似比を表し、 R の発展則 dR は式(11)で仮定される。

$$dR = -u \ln R \cdot A \sqrt{\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}} \quad (11)$$

ここで、 u は材料定数である。

2.6 塑性ひずみ増分の算出

降伏関数 f の適合条件 ($df=0$) を考えると、式(12)のようになる。

$$df = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T \{d\sigma_{ij}\} + \frac{\partial f}{\partial p_0} dp_0 + \frac{\partial f}{\partial R} dR + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} dp_{int} = 0 \quad (12)$$

式中、内部応力 p_{int} の発展則 dp_{int} は内部消散エネルギー式⁴⁾から式(13)で仮定する。

$$dp_{int} = -\lambda p_{int} A \left\{ \left(\frac{\partial g}{\partial p'} \right)^2 + M^2 \left(\frac{\partial g}{\partial q} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \zeta \nu S_{MH}^{\nu-1} dS_{MH} \quad (13)$$

式中パラメータ ζ , ν は初期内部応力の大きさを規定するパラメータである。また硬化則 dp_0 は、式(14)で定義する。

$$dp_0 = \frac{\partial p_0'}{\partial p_0} \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} p_0'^* A \frac{\partial g}{\partial p'} + \frac{\partial p_0'}{\partial p_{int}} dp_{int} \quad (14)$$

式(12)に、 R の発展則、 p_{int} の発展則および硬化則を代入し、 A について解くと、式(15)のようになる。

$$A = \frac{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D^e] \{d\varepsilon_{ij}\} + \left(\frac{\partial f}{\partial p_{int}} + \frac{\partial f}{\partial p_0} \frac{\partial p_0'}{\partial p_{int}} \right) \zeta \nu S_{MH}^{\nu-1} dS_{MH}}{H + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right\}} \quad (15)$$

ここで、 H は硬化係数である。 A を式(3)および式(4)に代入することにより、塑性ひずみ増分が求められる。

3. 提案する構成モデルの室内試験に対する適用性

図-1(a), (b)のプロットは東部南海トラフにおける深海底地盤の粒度を模擬した MH 胚胎土に対して行った三軸圧縮試験の結果²⁾である。図中 S_{MH} とは間隙の体積を占める MH の体積である。これに対して、提案する構成モデルを用いて解析予測を行った。解析予測に用いたパラメータを表-1 に示す。本報で説明していないパラメータの詳細は前報⁷⁾に詳しい。解析予測結果を図-1(a), (b)の実線で示す。比較のために、関連流れ則を仮定した構成モデルを用いて行った解析予測結果も同図に破線で示す。図-1(a)の $F_c=8.9\%$ に関しては、非関連流れ則を用いた解析結果の方が関連流れ則を用いたものに比べて実験結果を精度良く表現していることが確認

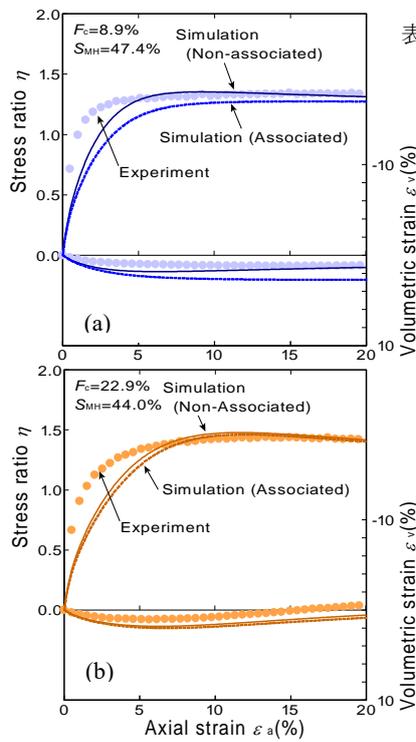


図-1 MH 胚胎土の三軸圧縮試験結果と構成モデルによる予測結果の比較

表-1 パラメータの詳細

Sample	$F_c=8.9\%$	
$S_{MH}(\%)$	47.4	
Flow rule	Associated	Non-associated
$p_0(\text{MPa})$	1	1
e_i	0.98	
λ	0.138	
κ	0.011	
M	1.24	
N	1.22	
u	45	
c	2.67	
d	1.1	
α	4	
β	5.5	
χ	5	
$\zeta(\text{MPa})$	8.0	
ν	3.8	
Sample	$F_c=22.9\%$	
$S_{MH}(\%)$	44.0	
Flow rule	Associated	Non-associated
$p_0(\text{MPa})$	1	1
e_i	0.86	
λ	0.115	
κ	0.012	
M	1.23	
N	1.00	
u	30	
c	4.07	
d	1.9	
α	1.7	
β	6.5	
χ	25	
$\zeta(\text{MPa})$	6.3	
ν	2.3	

される。図-1(b)の $F_c=22.9\%$ に関しては、流れ則の違いに依らず解析予測結果は概ね同じであり、実験結果をうまく表現している。従って、MH が存在する砂泥互層地盤の応力ひずみ関係は、提案する非関連流れ則を適用した構成モデルにより概ね表現できるといえる。

4. 結論

本研究では、非関連流れ則を適用した弾塑性構成モデルの構築を試みた。そして、提案する非関連流れ則を適用した構成モデルを用いることで、MH が存在する砂泥互層地盤の応力ひずみ関係を概ね表現できることを確認した。

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」の研究活動の一環として実施したものである。関係者各位に対し、謝意を表する次第である。

参考文献 1)鈴木清史ら：地学雑誌，Vol.118, No.5, pp.889-912, 2009. 2)中島晃司ら：地盤と建設，Vol.33, No.1, 2015. 3)橋口公一：土と基礎，Vol.52, No.10, pp.30-32, 2004. 4)Kasama, K. et al.: *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.35-47, 2000. 5)Yasfuku, N. et al.: *Proc. of Int. Conf. on Engineering Problems of Residual Soils*, Vol.1, pp.759-764, 1989. 6)安福規之：九州大学博士論文，1990. 7)Yoneda, J. et al.: *Frontiers in Offshore GeotechnicsII*, pp.245-250, 2011.