

大水深海底地盤採取試料の三軸圧縮試験についてのシミュレーション

メタンハイドレート 三軸圧縮試験 弾粘塑性構成式 エンジニアリング振興協会(清水建設) 国際会員 ○荻迫栄治
 同上 国際会員 西尾伸也
 同上 国際会員 傳田 篤
 京都大学大学院 国際会員 岡二三生
 京都大学大学院 国際会員 木元小百合
 エンジニアリング振興協会(伊藤忠テクノソリューションズ) 岡部直司

1. はじめに

メタンハイドレートは次世代資源として注目されており、日本周辺海底にも日本が消費している天然ガスの約 100 年分の量が存在すると推定されている。経済産業省が策定した「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」に従い、「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」が組織され、(財) エンジニアリング振興協会が環境影響評価に関する研究開発を行っており、筆者らは、この中で、メタンガス生産に伴う海底地盤の変形の可能性について検討を進めている。メタンハイドレートの資源フィールドの一つとして期待される南海トラフの大水深海域において基礎試験が行われた。今回、基礎試験で採取したコア試料を用いて行った三軸圧縮試験結果について、弾粘塑性構成式を用いて要素シミュレーションを実施し、試験結果との比較・検討を行った。

2. 検討条件

基礎試験は東海沖の水深 720m の海底地盤で海底面下 250m まで掘削が行われた。採取コアは細粒分含有率 85%以上の低液性の粘土である。なお、今回シミュレーションを行ったコア試料の採取深度は海底面下 8.5~225.0m である。試験条件等の詳細については別報¹⁾を参照されたい。この三軸圧縮試験を対象に、木元・岡らの提案する粘性土の弾粘塑性構成式²⁾を用いて、要素シミュレーションを行った。シミュレーションに際しては、せん断弾性係数 G のひずみ依存性および試料の初期構造変化を考慮した。すなわち、塑性せん断ひずみ $\gamma_p = \int \sqrt{de_{ij}de_{ij}}$ (塑性偏差ひずみ増分の第 2 不変量の蓄積値) を用いて、 $G/G_0 - \gamma_p$ の関係を $G/G_0 = 1 / \{1 + a(\gamma_p)^b\}$ と仮定した。ここで、 G_0 は初期のせん断弾性係数である。また、 a および b は実験パラメータである。今回の試験結果をシミュレートした結果より $b=0.4$ とした。さらに、コア試料の状態は現位置の状態に比べて変化している可能性が考えられるため、初期の試料の乱れの影響を考慮するために、構成式中の土の初期構造を表すパラメータ σ'_{mai} を圧密降伏応力より小さく設定した。

3. 検討結果および考察

表-1 に、試験条件と材料パラメータを示す。図-1 および図-2 はほぼ同程度の深度から採取された試料についてせん断時のひずみ速度を変えて試験を行った結果について、シミュレーション結果との比較を示したものである。軸差応力-軸ひずみの関係について見ると、試験結果(点線)は、当初ひずみの増加につれて応力は線形的に増加するが、その後増加の割合は緩やかになり、軸ひずみ 15% 近傍で最大強度に達する。また、ひずみ速度が大きい場合の方が小さい場合に比べて最大強度が大きくなっている。シミュレーション結果(実線)はこのような試験結果の挙動をよく表している

表-1 シミュレーションに用いた材料パラメータ

試料番号	2-3-1	2-4	6-1-4	6-3-3	6-4-2	9-2	22-4	29-1	30-2
軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{11}$ (%/min)	0.5	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
静止土圧係数 K_0	0.813	0.852	0.626	0.551	0.528	0.535	0.567	0.523	0.451
初期平均有効応力 σ'_{m0} (kPa)	70	73	289	269	261	433	1010	1353	1259
内部構造パラメータ σ'_{mai} (kPa)	70	75	320	190	250	180	860	1475	780
内部構造パラメータ σ'_{maf} (kPa)	229	233	443	417	413	578	1157	1200	1385
内部構造パラメータ β	30	30	110	200	4000	40	20	6	300
初期間隙比 e_0	0.808	0.826	0.897	0.864	0.777	0.603	0.746	0.707	0.551
せん断開始時間隙比 e_i	0.770	0.784	0.812	0.808	0.735	0.551	0.648	0.666	0.506
圧縮指数 λ	0.1055	0.1055	0.0937	0.0937	0.0937	0.0894	0.0838	0.1154	0.1154
膨潤指数 κ	0.0109	0.0109	0.0135	0.0135	0.0135	0.0143	0.0161	0.0191	0.0191
変相応力比 M_m^*	1.33	1.35	1.29	1.38	1.29	1.32	1.14	1.09	1.35
粘塑性パラメータ m'	8.8	8.8	9.3	10.0	16.5	10.0	10.2	10.0	10.0
粘塑性パラメータ C_0 (1/sec)	1.50×10^{-12}	1.50×10^{-12}	1.37×10^{-9}	4.06×10^{-13}	3.49×10^{-14}	2.46×10^{-13}	2.78×10^{-8}	6.36×10^{-9}	6.49×10^{-12}
初期せん断弾性係数 G_0 (kPa)	40000	38000	96000	87000	90000	125000	281000	319000	290000
ひずみ依存パラメータ a	40	25	540	500	950	250	40	550	500

Simulation of Triaxial Compression Tests on Soil Samples Obtained from Seabed Ground in Deep Sea, Eiji OGISAKO, Shin'ya NISHIO and Atsushi DENDA (Shimizu Corporation), Fusao OKA and Sayuri KIMOTO (Kyoto University), Naoji OKABE (ITOCHU Techno-Solutions Corporation)

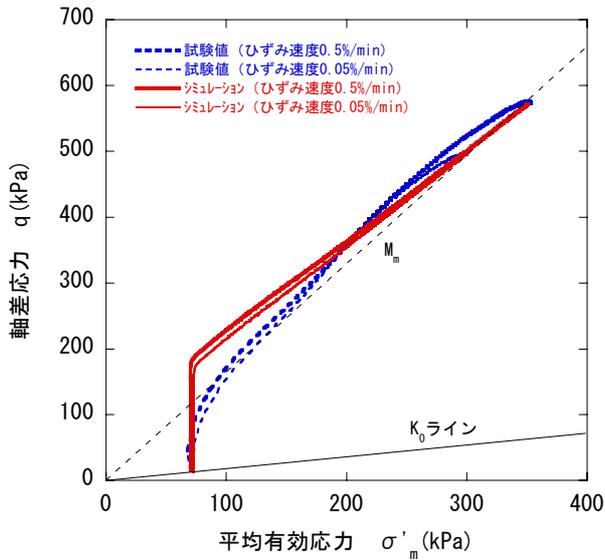


図-2 有効応力経路（ひずみ速度の影響）

ことがわかる。有効応力経路については、試験結果は、当初平均有効応力がほぼ一定のまま軸差応力が増加し、その後平均有効応力が増加しながら限界状態線に接近している。シミュレーション結果は平均有効応力の増加し始める時点の軸差応力値が若干異なるものの、概ね試験結果の挙動をよく表していると言える。図-3は異なる深度から採取された試料について実施した試験結果とシミュレーション結果の比較である。採取深度が深くなるにつれて、すなわち拘束圧が大きくなるにつれて最大強度は大きくなっている。また、拘束圧が最も大きいケースでは若干のひずみ軟化挙動を示している。シミュレーション結果はいずれもこのような試験結果をよく表していることがわかる。図-4は初期間隙比の異なる試料について実施した試験結果とシミュレーション結果の比較である。初期間隙比が小さい場合の方が大きい場合に比べて最大強度が大きくなっており、シミュレーション結果は試験結果とよく一致している。図-5は砂分を含む3つの試料について実施した試験結果とシミュレーション結果の比較である。それぞれ、試料Aは全体に細砂が卓越した試料、試料Bは砂と粘土の互層、試料Cは上部が砂層の試料である。採取深度が異なるため最大強度は異なるが、いずれも粘性土主体の試料とは異なり、ピークを示すことなくひずみの増加とともに応力も増加する傾向を示している。シミュレーション結果はこのような試験結果の傾向をよく表現している。

4. おわりに

大水深海域の海底地盤から採取したコア試料の三軸圧縮試験について弾粘塑性構成式を用いてシミュレーションを行った。その結果、ひずみ速度、拘束圧、初期間隙比、砂分含有の影響など試験結果に見られる挙動をシミュレーションによってよく表現できることが確認された。

参考文献 1) 西尾 他:大水深海域の海底地盤から採取した試料の三軸圧縮試験結果(その2), 第42回地盤工学研究発表会, 2007. 2) Kimoto S., F. Oka and Y. Higo, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193, pp.2845-2866, 2004.

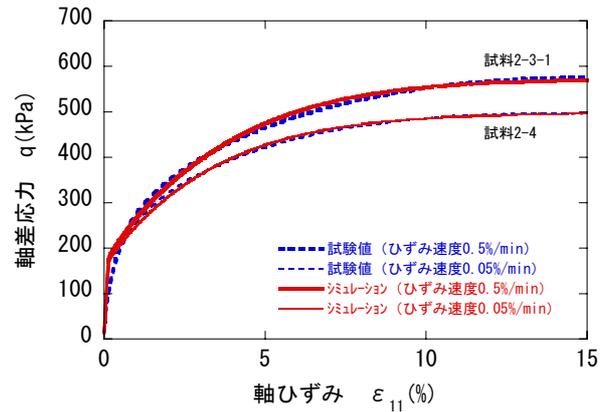


図-1 応力-ひずみ関係（ひずみ速度の影響）

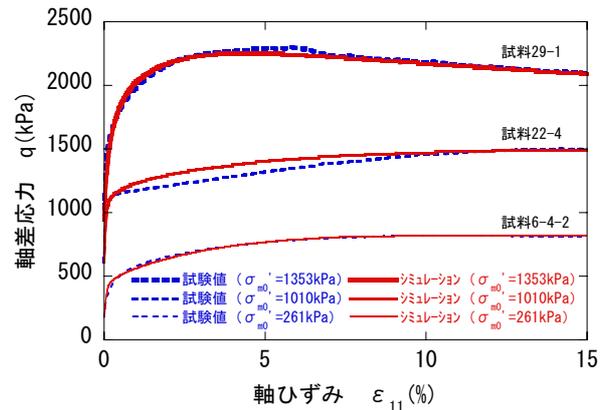


図-3 応力-ひずみ関係（拘束圧の影響）

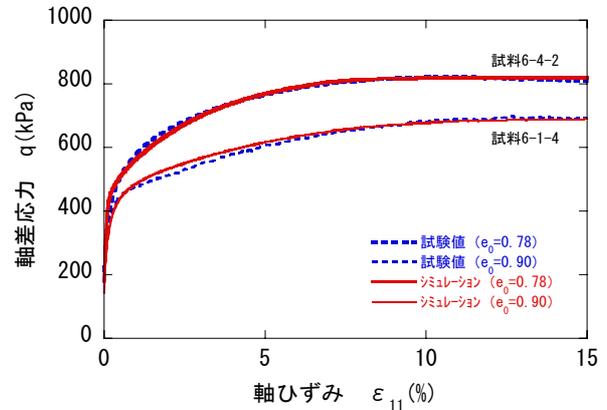


図-4 応力-ひずみ関係（初期間隙比の影響）

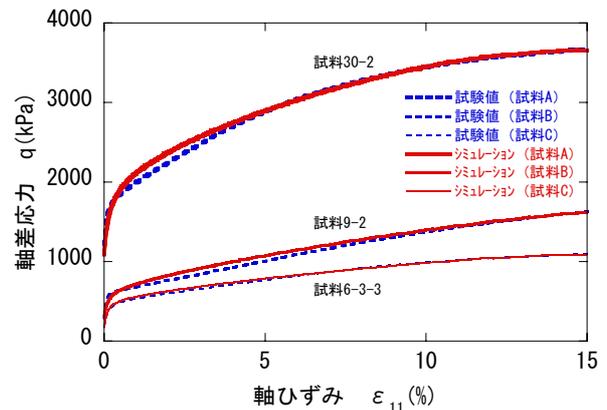


図-5 応力-ひずみ関係（砂分含有の影響）