

大水深海底地盤から採取した試料の三軸圧縮試験のシミュレーション

清水建設 フェロー会員 ○荻迫栄治, 正会員 西尾伸也
 清水建設 正会員 傳田 篤
 京都大学 フェロー会員 岡二三生, 正会員 小高猛司
 京都大学 正会員 木元小百合

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. 三軸圧縮試験とシミュレーションの概要 三軸圧縮試験は、直径 50mm、高さ 100mm に整形した供試体に対し、軸圧 1048kPa まで K_0 圧密したものの(正規圧密状態)と、その後、647kPa まで K_0 除荷したものの(過圧密状態: OCR=1.6)の 2 種類について、ひずみ速度 0.05%/min でひずみ制御の非排水せん断試験を行った。なお、用いたコア試料の採取深度は 773.25~773.85m (海底面 730m) である。

表-1 材料パラメータ

	過圧密	正規圧密
初期間隙比 e_0	0.8	0.812
圧縮指数 λ	0.0937	0.0937
膨潤指数 κ	0.0135	0.0135
初期鉛直応力 σ'_{v0} (kPa)	647	1048
初期静止土圧係数 K_0	0.568	0.473
圧密降伏応力 σ'_{mbi} (kPa)	676	680
初期せん断弾性係数 G_0 (kPa)	50000	50000
変相応力比 M_m^*	1.29	1.29
粘塑性パラメータ m'	10	10
粘塑性パラメータ C_0 (1/sec)	3.24×10^{-8}	2.50×10^{-7}
内部構造パラメータ σ'_{maf} (kPa)	676	680
内部構造パラメータ β	0	0
破壊応力比 M_f^*	1.29	1.29
透水係数 k (m/sec)	6.4×10^{-10}	2.7×10^{-10}

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¹⁾を用いて、要素シミュレーションを実施するとともに、有限要素法による 3 次元水-土連成解析を行った。シミュレーションに必要な材料パラメータは、試験結果から表-1 に示すように設定した。また、有限要素法解析は円柱供試体を六面体要素でメッシュ分割した。用いた要素は、変位場 20 節点、間隙水圧場 8 節点のアイソパラメトリック要素である。拘束条件としては、下面を鉛直・水平方向固定、上面を水平方向固定とし、試験のひずみ速度に応じて強制変位を供試体上面に鉛直方向に作用させた。また、排水条件としては、要素間の水の移動は許すが、境界全体を非排水条件とした。

3. シミュレーション結果および考察 図-1 および図-2 に応力-ひずみ関係並びに有効応力経路の要素シミュレーション結果と試験結果の比較を示す。軸差応力-軸ひずみ関係の試験結果は、いずれのケースも、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 10% 付近からは若干減少に転じている。一方、シミュレーション結果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、最大強度に達した後はほぼ一定の値を保持している。最大強度に達するまでのひずみ量が試験値とシミュレーション値で異なるものの、いずれも顕著なひずみ軟化は示しておらず、また、残留強度の値も両者は似かよっている。コア試料は現位置から採取される際に応力解放を受けることやコアリングの際に

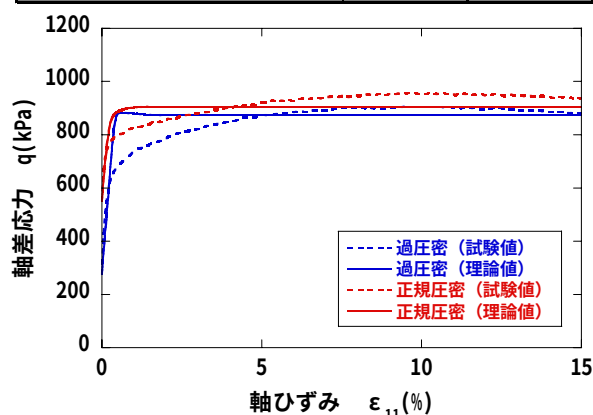


図-1 応力-ひずみ関係

キーワード：メタンハイドレート、弾粘塑性構成式、三軸圧縮試験、有限要素法、海底地盤

連絡先：〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 Tel:03-3820-6476 Fax:03-3820-5959

試料が乱されることから、コア試料の強度は現位置の状態に比べて低下している可能性が考えられる。線形弾性的に応力が増加した後の、最大強度に達するまでの応力の進展状況について、試験結果がシミュレーション結果より強度が低めである点については、このような試料採取時の乱れによる強度低下が一つの要因として推測される。一方、有効応力経路に着目すると、過圧密の場合、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位置が試験結果に比べて若干ずれるものの、全般的な傾向はよく表していると言える。また、正規圧密の場合、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減少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試験結果をよく表現できていることがわかる。過圧密状態の試料と正規圧密状態の試料の違いは上述した有効応力経路の違いに明確に現れており、試験結果に見られるこのような応力履歴の違いの影響をシミュレーション結果はよく表していることがわかる。

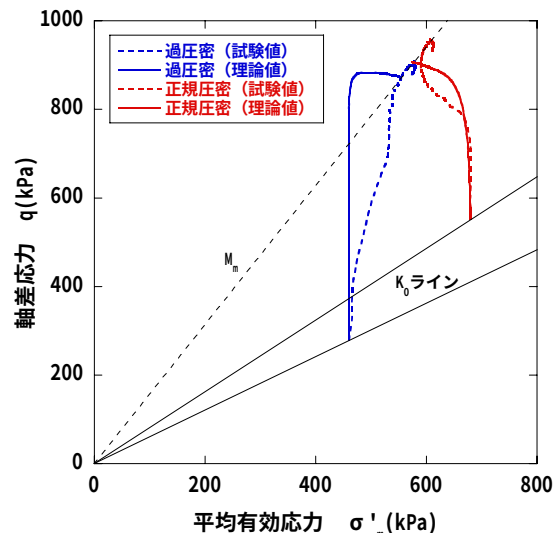


図-2 有効応力経路

図-3 に有限要素法解析結果のせん断ひずみおよび体積ひずみの分布図を示す。軸ひずみの増加につれて供試体内の中央部に次第にせん断ひずみが集中していく様子がわかる。一方、供試体上下面の中央に近い部分にはせん断ひずみの進展が見られず、ひずみの不均一化が明確に現れている。また、体積ひずみについては、圧縮が進行するにつれて、次第に供試体中央部が膨張し、上下端部が圧縮していく。また、供試体表面においてその傾向が大きい。すなわち、供試体上下方向および表面から内部に向かって不均一な圧縮変形をしている様子がわかる。変形は軸ひずみの増加につれて供試体の中央部が次第に横方向にはらみだしており、いわゆる樽型の変形モードを示している。図-4 に試験終了後の写真と解析結果の比較を示すが、解析結果は試験結果をよく再現していることがわかる。

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、シミュレーション結果は試験結果の傾向を概ねよく表していることがわかった。また、3次元有限要素法解析の結果によれば、供試体内でせん断ひずみ、体積ひずみが不均一に分布していることが判明した。ただし、解析結果には境界条件の影響があることも考えられ、この点については今後さらに検討を加えていきたい。

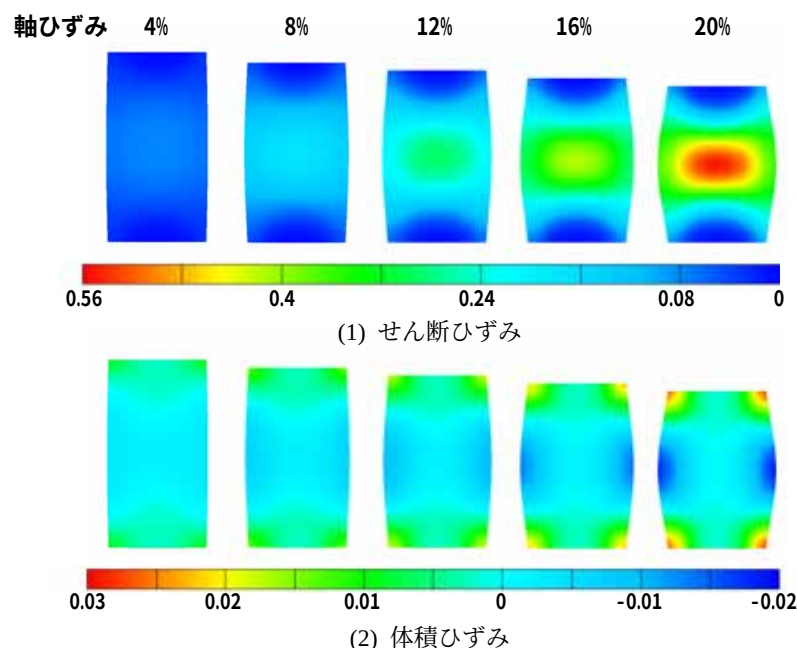


図-3 中央断面におけるひずみ分布図（過圧密）

謝辞 本研究を行うにあたり、(株)CRC ソリューションズ岡部氏・上山氏には多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) Kimoto S., F. Oka and Y. Higo, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193, p.2845-2866, 2004.



図-4 変形状況（過圧密：軸ひずみ 16%時）