

CS - 27

多孔質材料の凍結融解による劣化の解析

東京大学 正員 堀 宗朗
森広英和
東北大学 正員 柳沢栄司

1. まえがき

湿潤した岩石やコンクリートなどの多孔質材料が凍結融解作用を受ける場合、弾性・強度の低下や膨張等の劣化が生じる¹⁾。劣化が発生・進行する過程が長時間にわたるため、多孔質材料からなる構造物を低温下で供用する際には、この種の劣化に対して十分な対策を講じるべきである。合理的な対策のために、材料の劣化の発生・進行を定量的に解析し劣化の予測をする必要が大きいと考えられる。

上記を背景として、本研究は劣化解析のモデルと手法を構築する。これは、水分の凍結と移動による細孔の損傷として低温劣化を捕らえ、マイクロメカニクスを適用した解析である。そして劣化を多数の微小亀裂の進展によって評価し、進展量から弾性低下と膨張量を計算する。考案された劣化解析の妥当性を実験結果との比較によって検証し、ついで劣化解析を岩盤内における極低温物質貯蔵空洞に適用して有効性を検討した。

2. モデルと解析手法

多孔質材料の凍結融解作用による劣化のメカニズムは、細孔中の水分が凍結融解の際に膨張したり移動するため、これに応じて細孔壁に引張応力が働き、細孔壁が微小な損傷を多数受けることと考えられている（既存の研究は参考文献¹⁾を参照）。したがって、劣化の発生・進行を、強度に対応する細孔構造特性と外力に対応する細孔損傷力の強弱関係として扱うことを試みる。なお、前者は細孔の大きさの分布や細孔壁強度に対応し、後者は水分の凍結・移動に起因する。

本研究では、多孔質材料を劣化損傷体、細孔損傷力を亀裂開口力として、多孔質材料をモデル化する（図-1参照）。破壊基準を $K_c = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$ （ $K_{I,II}$ は応力拡大係数、 K_c は破壊靱性）として個々の亀裂の進展を決定し、弾性低下と膨張への寄与を計算する。この計算を損傷体内の全亀裂に行い材料の劣化を評価する。なお、亀裂の大きさ・方向・空間の分布や進展基準は細孔構造特性に、亀裂開口力は温度や凍結融解履歴に応じて決定される。多孔質材料の低温劣化は、凍結融解温度範囲・繰り返し回数・作用応力に強く依存する。種々の条件下で亀裂損傷体のモデル解析を行い、この3つの要因の

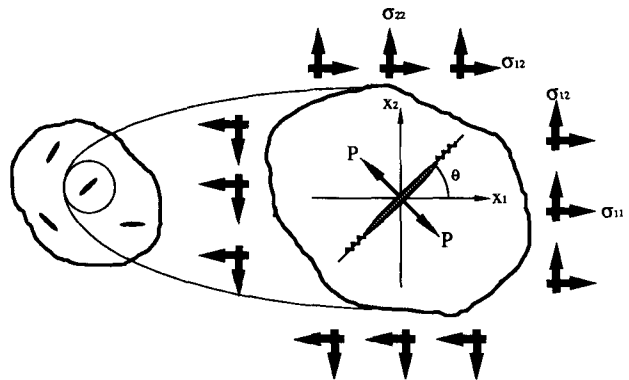


図-1 亀裂損傷体のモデル

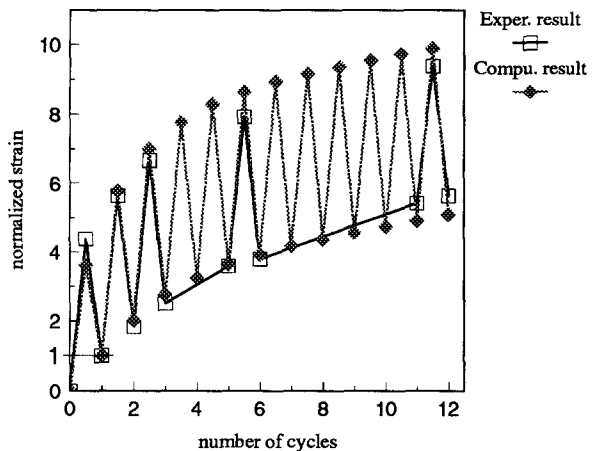


図-2 凍結融解の繰り返しと膨張歪

差による劣化の度合の差をシミュレートし、既存の実験の結果と比較した。

一例として凍結融解の繰り返しによって増大する膨張歪の解析結果と実験結果²⁾を図-2に示す。解析結果は実験結果を比較的良好に再現している。他の2つの要因の影響も同程度に再現された。なお、シミュレーションでは、実験によって報告されているコンクリートの細孔構造分布と破壊靱性から亀裂損傷体の亀裂分布と K_{IC} を用い、細孔内の水分の凍結は径に依存した温度範囲の中で開始することと細孔の損傷や噛み合わせが非可逆的な変形を生じることを表す亀裂開口力を用いた（詳細は参考文献¹⁾を参照）。

3. 岩盤の劣化解析モデルの適用例

本研究で考案された劣化解析の有効性を検討するため、液化天然ガス（ -162°C ）の岩盤内地下貯蔵空洞を想定し空洞周囲の岩盤の劣化度推定を行った。具体的には、参考文献³⁾を基に初期温度 0°C の岩内の深さ60m直径10mの空洞液化天然ガスを注入する際の、岩盤の挙動をシミュレートした。図-3に定常状態に達した空洞の温度分布を示す。

多孔質材料の低温劣化は細孔構造の損傷という力学的な現象に起因するため、場所毎の応力の状態を考慮する必要がある。応力状態には劣化による弾性低下や膨張が影響する。したがって、解析には有限要素法を用いた応力・熱伝導・劣化の連成解析を行なった。簡単のため増分線形計算を行い、微小温度の低下に対して、熱伝導と応力解析を行い、その結果生じる弾性低下と膨張を計算することを繰り返す。

数値計算結果の一例として、空洞中心から30mの範囲での弾性係数の低下を図-4に示す。数値は劣化前の弾性係数に対する劣化後の弾性係数の割合である。中心から約20mに及ぶ範囲において80%程度の弾性の低下が見られている。低温下の岩の特異な挙動には研究があるものの実際の岩盤の劣化に関しては報告がなく、この数値計算結果の妥当性を論じることができない。しかし、得られた結果は直観的には妥当と思われる、劣化解析の有効性が伺える。

4. 結論

多孔質材料の凍結融解による劣化を予測するため、解析のモデルと手法を構築した。これは、水分の凍結移動による細孔構造の損傷をマイクロメカニクスに基づいて解析するものであり、既存の実験結果を比較的良好に再現することに成功した。さらに、実際的な問題として極低温貯蔵空洞周辺の岩盤の低温劣化に対して劣化解析を行い、実用性の検討も行った。

参考文献

- 1) 森広英和：岩石やコンクリートの凍結融解作用による劣化に関する力学的考察。修士論文、東北大学、1994。
- 2) F.S.Rostásy, U.Schneider, and G.Wiedemann: Behavior of mortar and concrete at extremely low temperatures. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*, Vol. 9, pp. 365-376, 1979.
- 3) 石塚与志雄, 木下直人, 奥野哲夫: L P G 岩盤内貯蔵空洞の熱応力に対する安定性の検討。土木学会論文集, No. 370/III-5, pp. 243-250, 1986.

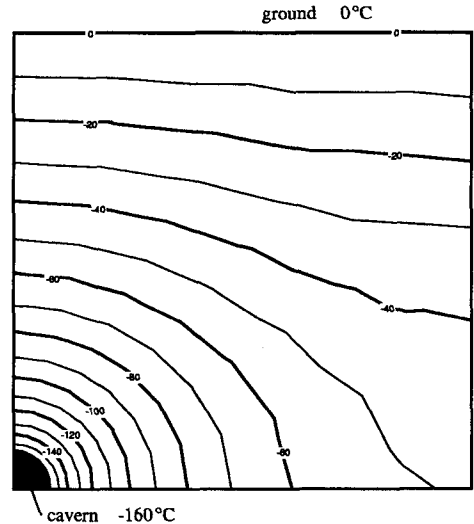


図-3 低温物質長蔵空洞の温度分布

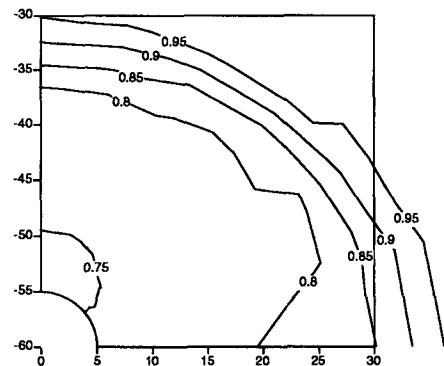


図-4 空洞付近の弾性係数の低下度