

III-118 岩石の熱収縮破壊について

戸田建設(株) 正会員 西牧 均
同 上 正会員 日景 秀治
同 上 赤田 弘基

1. まえがき

低温液化燃料の地下岩盤内貯蔵において、低温下での岩石の特性、温度応力に対する構造体としての挙動を解明する必要がある。そこでLPGの低温常圧岩盤内貯蔵を対象として、低温における岩石の熱収縮破壊に関して冷却速度、既存クラックを考慮した基礎実験を実施し、FEM熱解析結果と比較したので、ここに報告する。

2. 実験方法

実験に用いた岩石試料は、茨城県稲田産の花崗岩であり、寸法は $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 15\text{cm}$ の岩石ブロックである。この岩石ブロックの中心に直径 5cm の円孔を開け、円孔内壁部を液化窒素を用いて冷却した。実験装置は図1に示す通り、岩石ブロックの上下面を熱の流入を防ぐために断熱材で覆い、側面は銅製箱に水を流すことで一定温度(約 15°C)に保つようにしている。熱収縮破壊の発生時期を推定するためAE(アコースティックエミッション)の測定を行った。AEセンサーの周波数帯域は $100\text{kHz} \sim 400\text{kHz}$ 、測定増幅率は 75dB である。温度分布は、熱電対を用いて岩石試料内9ヶ所で測定した。

実験は、岩石の含水条件、冷却速度、既存クラックの影響を調べるため、風乾状態と飽和状態に対してそれぞれ $60^\circ\text{C}/\text{時}$ 、 $20^\circ\text{C}/\text{時}$ の冷却速度(孔壁から 5mm 位置での岩石内温度変化)で行った。また、飽和状態でクラック(巾 1mm 、深さ 10mm)を入れた場合についても上記通りの冷却速度で行った。

3. 実験結果

AEカウント数・温度・経過時間の代表例を図2に示す。また、図3に冷却速度 $60^\circ\text{C}/\text{時}$ での風乾状態、飽和状態、クラック有りの場合のAEカウント数と温度との関係を示す。図に示した温度は、孔壁から 5mm の位置での温度である。また、全て1回目の冷却実験の結果である。

AEの発生する温度は、各ケースとも $-35 \sim -40^\circ\text{C}$ であり、 -50°C 以下になると急激に増加している。試料の含水状態の影響は顕著であり、飽和状態が風乾状態に比べAEの発生が非常に多くなっている。また、クラックの存在によりAEの発生数は減少している。実験後の目視観察では、熱収縮クラックの存

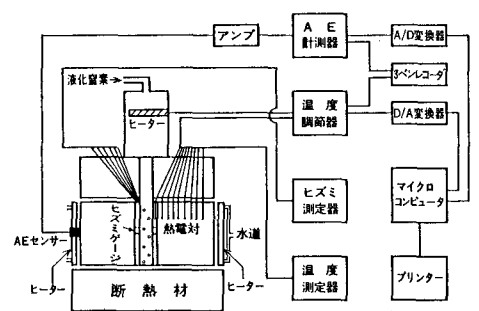


図1 実験装置図

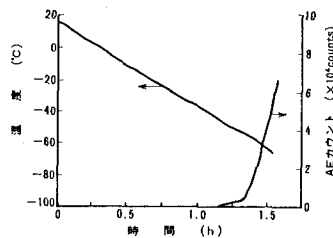


図2 温度～時間～AEカウント数の関係(冷却速度 $60^\circ\text{C}/\text{時}$)

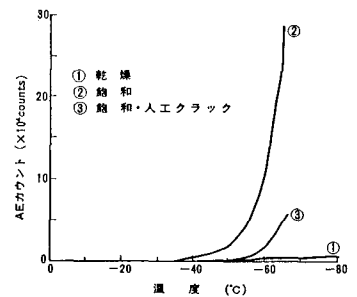


図3 AEカウント数と温度の関係(冷却速度 $60^\circ\text{C}/\text{時}$)

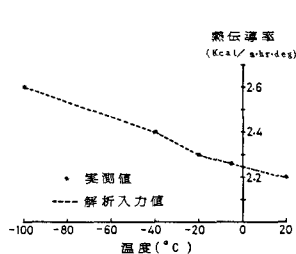


図4 熱伝導率の温度依存性

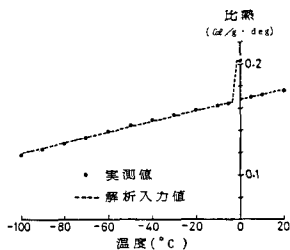


図5 比熱の温度依存性

なクラック端においても確認できなかった。

4. 解析及び考察

飽和状態、クラックを入れた場合について温度分布、温度応力を FEM 非定常熱解析によって求め、実験と比較した。物性値は、図4,5に示した熱伝導率、比熱及び図示してないが熱膨張率が温度依存性を示すため、これを解析に考慮している。実験に用いた岩石では、弾性係数、ポアソン比の温度依存性が小さいので一定とした。

解析による温度分布と実測値は図6,7に示す通りよく一致しており、冷却速度 $20^{\circ}\text{C}/\text{時}$ では併記した定常解とはほぼ同じであるが、 $60^{\circ}\text{C}/\text{時}$ では温度勾配がきつくなっている。両解析による温度応力は、 -20°C の時点で岩石の引張強度を越えており、AE の発生温度と一致していない。この理由として解析方法の問題、試料の寸法効果、AE の増幅率が小さい等が考えられる。

図8に孔壁面が -45°C の時点の最大引張応力分布を示す。図より明らかにクラック端に応力集中が生じ、孔壁周辺でクラックの無い場合に比べ応力が低下している。この応力低下によって AE の発生が減少したと考えられるが、クラック端での応力集中による AE の発生は見られなかった。クラック端やクラックの無い場合に熱収縮クラックが確認できなかったのは、微小クラックの発生による同様な応力の低下によって目視できるクラックまでいたらなかったためと思われる。

5. あとがき

熱収縮破壊実験と FEM 熱解析を行い、数値解析に岩石物性値の温度依存性を考慮することで温度分布において実験値とよい一致を見た。また、既存クラックの存在は孔壁周辺の応力状態を有利にするが、クラックの進展を促進する応力集中を生じるので、今後既存クラックの挙動について実験・解析を進めて行く予定である。

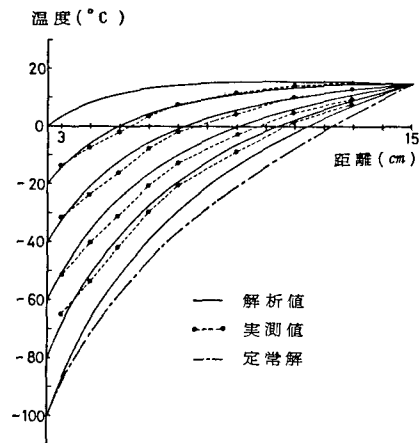


図6 温度分布 (冷却速度 $60^{\circ}\text{C}/\text{時}$)

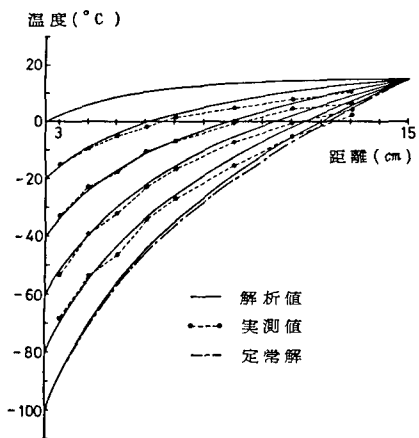
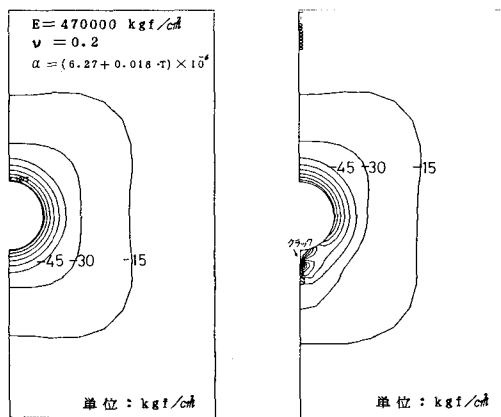


図7 温度分布 (冷却速度 $20^{\circ}\text{C}/\text{時}$)



(a) クラック無しの場合

(b) クラック有りの場合

図8 冷却速度 $60^{\circ}\text{C}/\text{時}$ における最大引張応力分布 (孔壁温度 -45°C)