

熱水の地下岩盤内空洞貯蔵に関する研究

愛媛大学工学部 正会員 稲田 善紀
愛媛大学大学院 学生員 真鍋 孝信

1. はじめに

近年、生活の質の向上により各家庭で熱湯の使用量が増加してきている。そこでエネルギー資源の有効利用の面から、ゴミ焼却により発生する廃熱、太陽熱および地熱等を利用し水を熱水の形に変え利用することが考えられる。この場合、安価で多量の熱水を時間帯や季節に関係なく安定して供給するためには、熱水を一時的に貯蔵しておく必要がある。その一つの方法として地下岩盤内空洞に貯蔵する方法が考えられる。この場合、空洞周辺の温度分布が時間的に変化しそれとともに熱応力も変化するので、空洞の安定性が問題となる。ここでは、まず、空洞周辺の温度分布を求めるのに必要な岩石の熱拡散率を要素分割法を応用し、種々の温度において同時に求めた。次に、空洞周辺の温度分布の時間的変化を要素分割法を用いて求め、これによって発生する空洞周辺の応力状態を有限要素法にて解析し、空洞の安定性について考察した結果について述べる。

2. 高温下における熱拡散率

10×20×25cmの花崗岩および安山岩の乾燥状態(Dry) および湿潤状態(Wet) の試料を用い、一つの面を加熱し一次元的に熱が伝導するようにし実測した温度曲線を要素分割法で得た温度分布と比較することによって熱拡散率(κ)を求めた。その結果、図1に示すように、100℃ までの範囲では、その値に大きな差がなく、花崗岩では $\kappa = 12.0 \sim 12.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、安山岩では $\kappa = 8.5 \sim 9.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の値をとることがわかった。このとき、液体または気体が固体に接することによって生じる表面熱抵抗を等価の厚さ(δ)として求めたところ、花崗岩および安山岩ともにDryの試料では $\delta = 1.1 \sim 1.9 \text{ cm}$ 程度、Wetの試料では $\delta = 0 \sim 0.2 \text{ cm}$ 程度であると推定され、実用上は、等価の厚さを無視してもよいことがわかった。

3. 空洞周辺の温度分布

土被り100mの新鮮で亀裂のない花崗岩岩盤中に直径10mの単一円形空洞を設け、この空洞内に熱水を直接貯蔵した場合を想定し、この空洞周辺に発生する非定常の温度分布を差分法と有限要素法の長所を合わせもつ要素分割法で求めた。その結果は図2に示すとおりである。この図から、初期の時間には急激な温度勾配を示しかつ時間の経過とともにその勾配は緩やかとなり、約一年後ではほぼ準定常状態となることがわかる。一方、厳密解の近似式および実験によって得た温度分布と比較すると図2に示すようによく一致しているので、要素分割法を用いて空洞周辺の温度分布を求めることの妥当性が確かめられた。

4. 空洞周辺の応力解析

高温下における岩石強度や熱物性値はとも

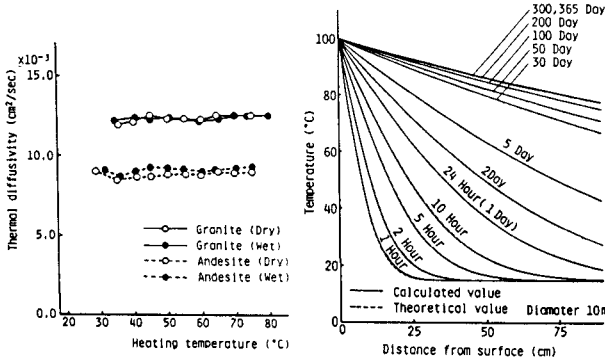


図1 高温下における熱拡散率の変化

図2 単一円形空洞周辺の温度分布の時間的変化

表1 解析に用いた岩石の物性値(花崗岩:湿潤状態)

温度範囲 ($^{\circ}\text{C}$)	線膨張係数 ($1/^{\circ}\text{C}$) $\times 10^{-6}$	弾性係数 (kgf/cm^2) $\times 10^8$	ポアソン比	圧縮強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)
10-20	-	0.510	0.16	1788	90
20-30	7.7	0.522	0.16	1772	88
30-40	7.7	0.533	0.16	1755	87
40-50	7.8	0.545	0.16	1739	85
50-60	7.9	0.556	0.16	1722	84
60-70	8.3	0.568	0.16	1706	82
70-80	8.6	0.579	0.16	1690	81
80-90	9.1	0.591	0.16	1673	78
90-100	9.6	0.602	0.16	1657	78

に変化することが予想され、かつ地下の岩盤は湿潤状態にあると考えられる。高温下における湿潤状態の岩石の強度や熱物性値はすでに別の実験によって求めているのでこれらの値を用い（表1参照）、空洞周辺の応力解析を行った。岩盤中の破壊条件はMohrの破壊包絡線説に従うものとした。熱水貯蔵前には、地山の自重による応力のみが発生し、土平において最大圧縮応力が発生しているが破壊に至るような応力でなく空洞は安定していた。熱水貯蔵後は、空洞周辺に生じた熱膨張により、岩盤は空洞内部に張り出そうとするが、これは空洞を縮めることになるので円周方向に圧縮応力が生じ、空洞の変形がある限界に達すると逆に地山内部の半径方向および接線方向に圧縮応力が生じる。この値は図3に示すように時間とともに増大し、空洞周辺の温度分布がほぼ準定常になる一年後において最大となる。単一円形空洞では図4に示すように土平において最大圧縮応力が発生し、双設空洞では両空洞の相互作用により図5(a)、(b)

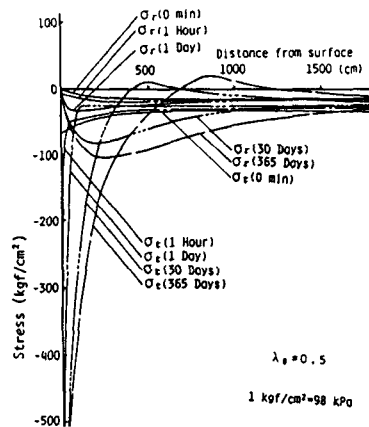


図3 水平軸方向における単一円形空洞周辺の応力分布

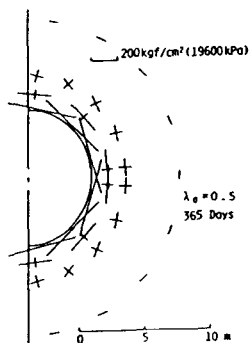
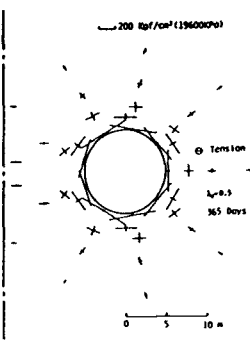
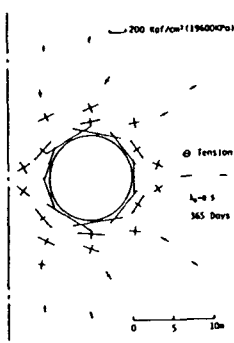


図4 単一円形空洞の最大および最小主応力方向線図



(a) 空洞表面間20m



(b) 空洞表面間10m

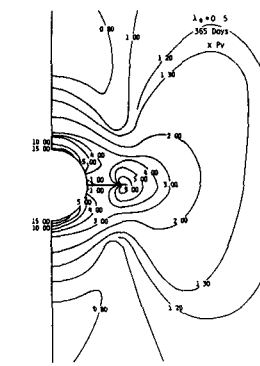


図6 スリットを設けた場合の最大および最小主応力方向線図

に示すように空洞上下端で最大圧縮応力が発生する。これらは花崗岩の圧縮強度の約2/5程度、また天端上部において発生する最大引張応力は花崗岩の引張強度の約1/2程度であり、破壊判定の結果熱水貯蔵後も空洞は安定していることがわかった。また空洞表面付近に生ずる圧縮応力を抑制する一方法として人工的に水平方向に3cm×5mのスリットを設けた場合について解析を行ったが、温度分布のほぼ準定常状態になる一年後において図6に示すようにスリットを設ける前の約1/20の圧縮応力となり、応力抑制に効果をもつことがわかった。

5. おわりに

本研究では、熱水を地下岩盤内空洞に直接貯蔵した場合の空洞周辺の応力状態を検討してきた。その結果、単一円形空洞の場合、熱水貯蔵前後において空洞は安定していた。双設空洞の場合、空洞表面間を直径の2倍とした場合熱水貯蔵前後において空洞は安定しており、熱損失の減少や土地の有効利用を考えて空洞間隔をさらに縮めて空洞表面間を直径分とした場合も熱水貯蔵前後において空洞は安定していた。またスリットを設けることにより応力抑制ができることがわかった。以上のことから都市近郊において良好な岩盤が選べれば、地下岩盤内空洞に熱水を貯蔵することが理論的に可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 稲田善紀・八木則男：「低温下における岩石の熱物性値」，材料，29，327，1980，PP.74～79
- 2) 稲田善紀・横田公忠・時川忠：「熱水が岩石の強度および変形特性に及ぼす影響」，土木学会論文集，370，Ⅲ-5，1986，PP.217～223