

熱水の影響を受ける空洞周辺岩盤の温度分布と安定性

TEMPERATURE DISTRIBUTION AND STABILITY OF ROCK MASS AROUND CAVERNS AFFECTED BY HEATED WATER

木下尚樹*・稲田善紀**

Naoki KINOSHITA and Yoshinori INADA

The authors have proposed and discussed temporary storage of heated water in caverns excavated in rock mountains. In this case, the rock mass around caverns will receive the affect of high temperatures. From the results of the previous research, it was found that non-steady heat conduction and thermal stress occurred in the rock mass. Therefore, evaluation of the temperature distribution around caverns becomes one of the important problems for the stability of caverns. In this study, temperature distribution around caverns when heated water was stored was analyzed considering convection of the heated water and discussed. From the results of the analysis, it was supposed that the convection of heated water affects on the temperature distribution. Then using the results of the temperature analysis, the thermal stress distribution was analyzed and the stability of the caverns was discussed.

Key Words: temperature distribution, heated water storage, openings, convection, stability

1. 緒 言

地球温暖化防止対策や循環型社会構築など新たに取り組むべき環境問題が発生し、化石燃料の使用量を抑えるだけでなく、未利用資源開発やこれまで廃棄物として処理されてきた資源の再利用技術の開発が盛んになってきている。筆者らはごみ焼却場や発電所などで発生する余剰な廃熱により熱湯を得、地域暖房や給湯、温水プール、ビニールハウス、養魚、融雪道路など多目的に利用する「熱水貯蔵システム」を提案し、検討を行ってきている。水は熱容量が高く、扱いやすい物質であり、しかも多量に安価で入手できる利点がある。熱水の安定供給のための一時貯蔵施設としては、地山内に設けた岩盤空洞を利用する方法を提案している。国土が狭く、平野の少ない我国においては有効な方法と考えられる上、岩盤空洞の特性である断熱性を生かせ、周辺環境へ及ぼす影響も少ない。

筆者らのこれまでの検討の結果、空洞周辺岩盤には空洞内の熱水を熱源として非定常の温度分布が生じ、これに伴い熱応力が発生し、空洞の安定性に影響を及ぼすことがわかっている。このことから、空洞周辺岩盤の温度分布を把握することは空洞の安定性を検討する上で、重要になってくると考えられる。熱水を岩盤空洞に貯蔵した場合には、空洞内の熱水は熱源として周辺岩盤に温度を伝達し、熱水自体は対流し、空洞内では一様な温度ではなく温度分布を生じていると考えられる。本研究では、空洞内の熱水の対流現象も考慮して周辺岩盤の温度分布を求めることとし、供試体を用いた室内貯蔵実験を行い温度分布を測定した。次にコントロール・ボリューム法を用いて温度分布解析を行った。また、その結果を基に空洞の安定性を検討した。

* 正会員 工学修士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

** フェロー会員 工学博士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

2. 供試体を用いた室内貯蔵実験

(1) 実験方法

石膏供試体に岩盤空洞を模擬した孔を設け、熱水を貯蔵して孔内および孔周辺の温度分布の経時変化を観察した。図-1に示すように寸法 $40\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の直方体石膏供試体の $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の面に中央に直径 10cm 、深さ 40cm の孔を設け、この孔内に熱水を貯蔵する。孔を設けた2面には厚さ 5cm の断熱材を取り付け、2次元の温度分布が得られるようにした。

温度の測定にはT型熱電対を用い、孔両端から 20cm の供試体中央断面付近に他の熱電対に影響のないように配置した。熱電対の配置は図-2に示すように孔中心から鉛直上下方向および水平方向に、孔の中心、中心より 1.0cm 、 3.0cm 、 4.5cm の孔内、孔周辺には孔の中心から 5.5cm 、 6.5cm 、 8.0cm 、 10.0cm 、 13.0cm および 15.0cm の計28箇所である。初期温度は石膏供試体が 8.2°C 、熱水は 60.0°C で外気温は 12.0°C であった。

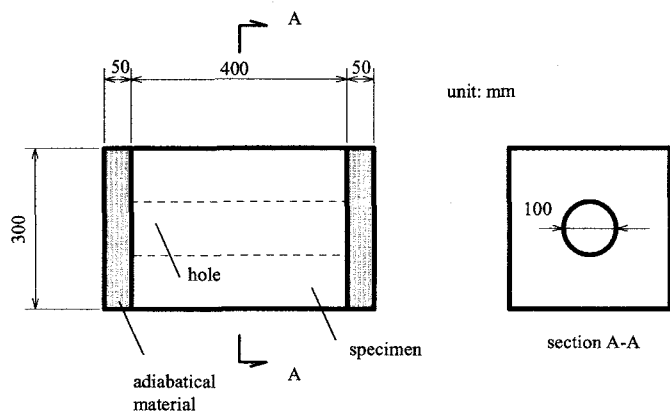


図-1 室内貯蔵実験の供試体

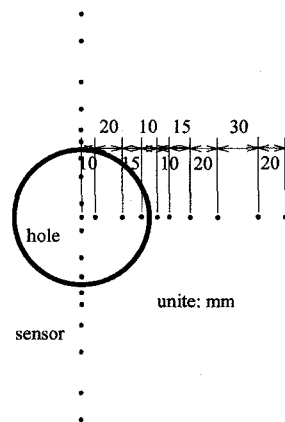


図-2 センサー位置図

(2) 実験結果および考察

実験結果から温度分布の経時変化を孔の鉛直上下方向、水平方向別に取りまとめたのが図-3～図-5である。孔内の熱水の温度は時間の経過と共に低下している。いずれの時間においても中心より 2cm 上方付近が中心よりわずかながら温度が高く、孔表面に向かって温度が低くなっている。また、孔表面から 1cm 付近で温度勾配が大きく、熱水の温度は急激に低くなっており、熱伝達における温度境界層を観測することができたものと考えられる。3方向とも同様な温度分布になっており、方向による温度分布の違いは大きくない。

また、孔周辺の温度分布は初期の時間には孔表面付近にしか熱は伝わっておらず、温度勾配も大きいですが、時間の経過に伴い孔周辺にも熱が伝導し、温度勾配も小さくなってくることがわかる。

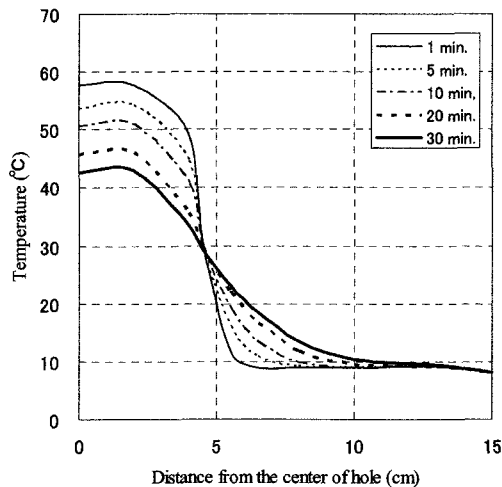


図-3 温度測定の結果（鉛直上方）

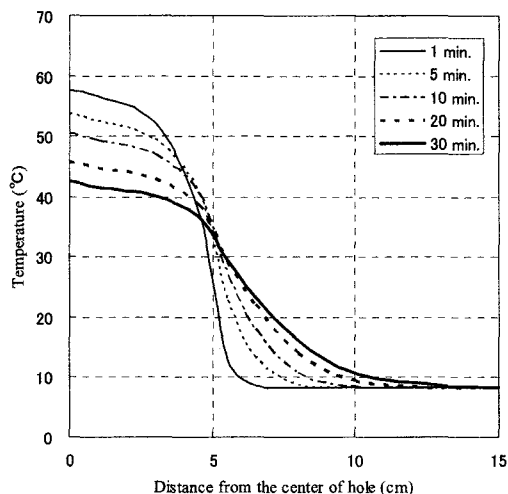


図-4 温度測定の結果（水平方向）

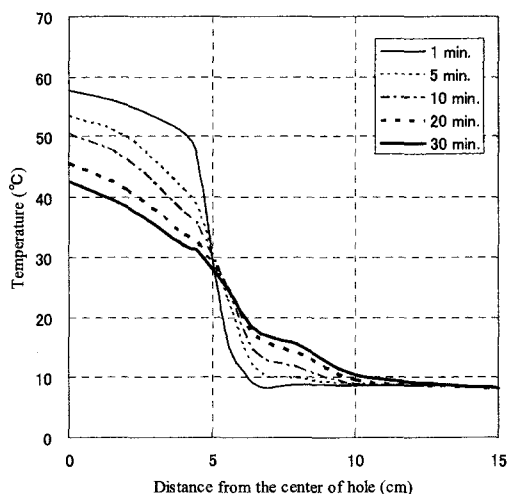


図-5 温度測定の結果（鉛直下方）

3. 熱水の対流現象を考慮した温度分布解析

(1) 解析方法

本研究で想定しているような岩盤空洞内へ熱水を貯蔵した場合の熱的現象は、空洞内の熱水の対流現象、熱水から空洞表面岩盤への熱伝達、周辺岩盤の熱伝導現象、岩盤内地下水の対流現象などが考えられる。これらの現象を考慮し、温度分布を解析によって求めるには、エネルギー方程式、運動方程式および質量保存式の3つの保存方程式が必要となる。

これら3つの保存方程式は式(1)に示すように変数を ϕ とした一般形保存方程式で表すことができる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

ただし、 ρ は密度、 $\mathbf{u}$ は速度場、 Γ は拡散係数、 S は生成項。

この一般形保存方程式の左辺の第1項および第2項を非常数項、移流項、右辺の第1項は拡散項と呼ばれており、コントロール・ボリューム法¹⁾により離散化した。

空洞内に貯蔵された熱水は温度が変化することにより密度の変化が生じる。これは熱水に生じる重力（体積力）の差になり、それによって空洞内には対流運動が発生する。この現象を考慮するため、本解析においては体積力をブシネスク力で表すこととした。

次に、空洞表面においては熱水と岩盤の間で、すなわち、液体－固体間で熱伝達が生じる。筆者らのこれまでの研究により、熱水－岩盤間の熱伝達における表面熱抵抗は“等価厚さ”で0～数cmであり、実際規模の空洞モデルで解析する場合は無視できることがわかっている²⁾。本解析ではエネルギー保存則より、熱流速と温度が液体－固体間で連続であるとした。

(2) 岩盤空洞を想定した温度分布解析

解析モデルは花崗岩岩盤内の直径10mの円形空洞に熱水を貯蔵する場合を想定し、空洞表面から上下および横方向に100mの位置を境界とした。また、左右の対称性を考え、空洞中心を通る鉛直線を対称軸とし、片方を解析対象とした。初期値は空洞内の熱水を100℃、岩盤を15℃とし、境界は15℃一定とした。なお、

境界の位置，要素分割を決定するに当たって，試行錯誤的に数種類のモデルにて解析を行い，結果にばらつきがなく，かつ，計算時間が短くなるように境界の位置，要素分割を決定した。

解析に必要となる花崗岩岩盤の熱物性値は，密度を 2650kg/m^3 ，定圧比熱を 0.997kJ/kgK ，熱伝導率を 3.25W/mK とした。また，熱水の物性値は温度によって値を変化させたが，例えば 100°C においては，密度を 958.4kg/m^3 ，定圧比熱を 4.216kJ/kgK ，粘性係数を $0.284 \times 10^{-3}\text{Pas}$ ，熱伝導率を 0.682W/mK ，体積膨張係数を $0.78 \times 10^{-3}/\text{K}$ とした。

前述のように岩盤内地下水は流動しており，また，温度変化することによって地下水の対流も考えられるが，後述するように岩盤の透水係数が小さければ，これらの現象は岩盤の熱伝導に対してほとんど無視できるものと考えられる。

実際には熱水の需給量が季節や時間帯によって変化し，空洞の大きさによっても温度分布はそれぞれ違ったものになると考えられる。ここでは一例として，初期温度から常に 100°C の熱水が供給されている状態（空洞内の熱水は 100°C で一定）で周辺岩盤の温度分布が準定常状態になるまで保った後，熱水の供給を止めた場合について解析を行った。結果を図-6および図-7に示す。熱水の供給を停止してから3ヶ月後には熱水の温度は約 85°C ，6ヶ月後には約 70°C まで低下している。熱水は対流しており，空洞内の熱水の温度差はあまり大きくない。また，周辺岩盤の温度分布はいずれの時間においてもほぼ同心円状であり，時間の経過に伴い岩盤の温度は全体的に低下し，温度勾配も緩くなる傾向にある。

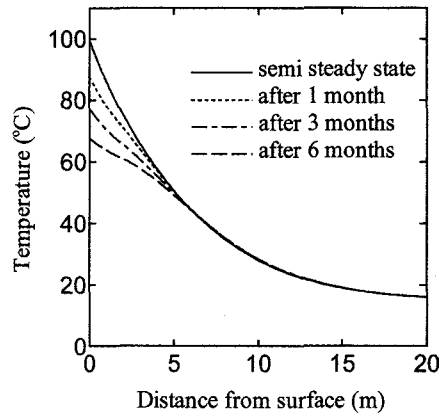


図-6 温度分布の経時変化

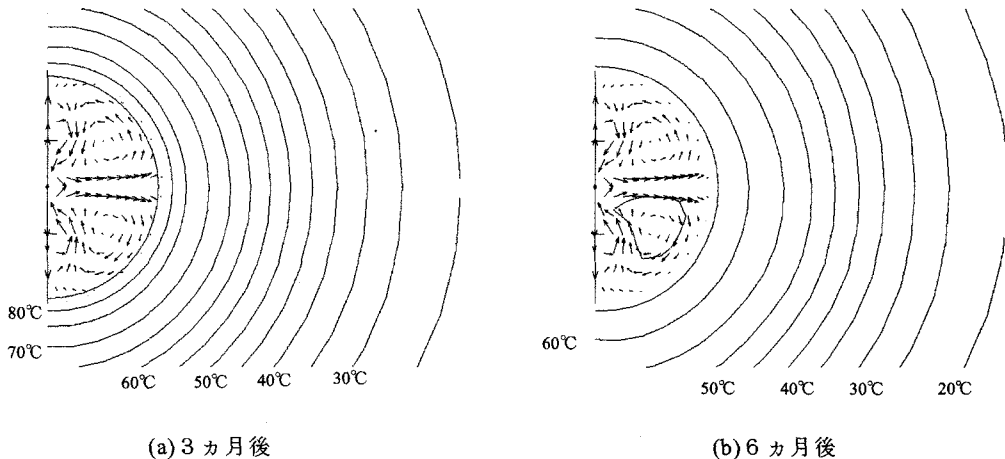


図-7 対流を考慮した温度分布解析の結果

4. 安定性解析

温度分布の解析結果を用いて FEM に時間の概念を取り入れた逐次破壊解析³⁾を行い，空洞周辺岩盤の応力分布を求めた。解析は平面ひずみ問題として取り扱い，破壊判定は Mohr の破壊包絡線説に従うものとした。初期応力は岩盤の自重と自重の $1/2$ の側圧とし，そこに熱応力が重畳されるものとした。

結果を図-8に示す。準定常状態までは空洞周辺の熱膨張により岩盤は自由面である空洞内部に張り出し、できるだけ円に近い状態になろうとするが、逆にこれは空洞を縮めることになり、その結果円周方向に大きな圧縮応力が生じたものと推察される。また時間の経過に伴い温度が周辺に及び、半径方向および接線方向に大きな圧縮応力が発生したものと考えられる。その後、空洞内の熱水の温度が低下するため熱応力が減少し、空洞から約2m付近で接線の圧縮応力が最も大きくなっている。

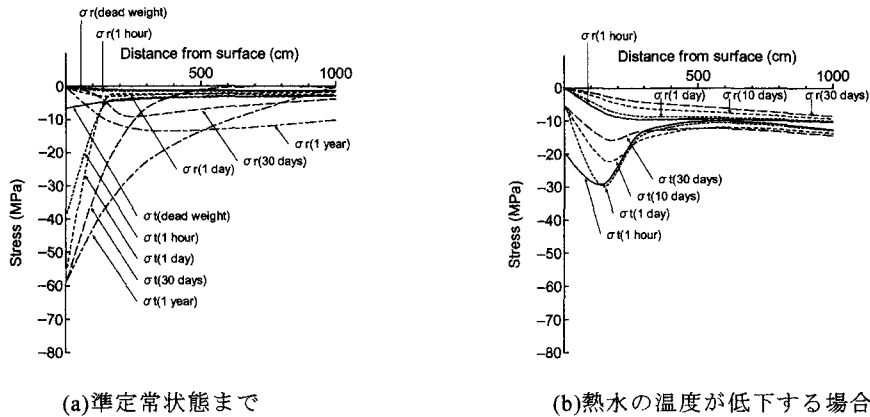


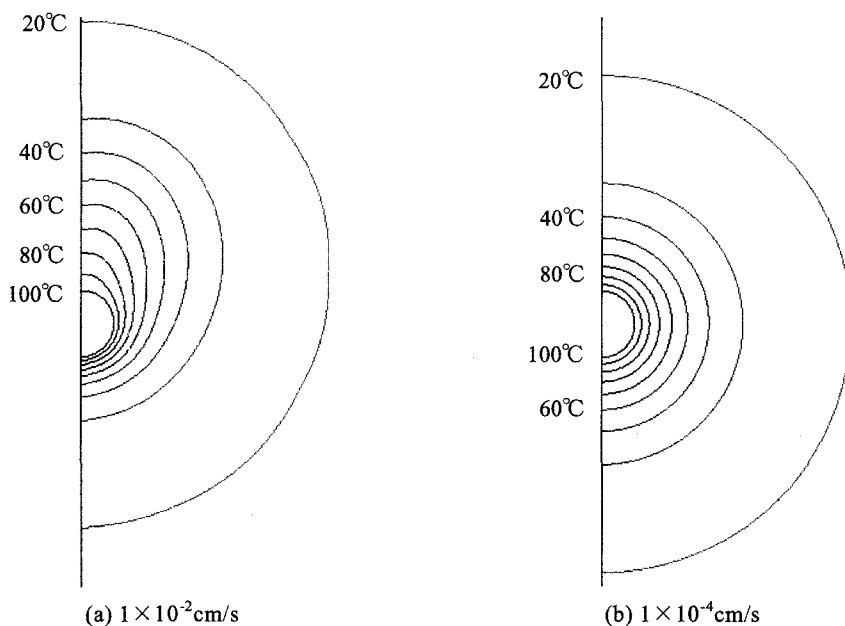
図-8 空洞周辺の応力分布の経時変化

5. 地下水の対流を考慮した温度解析に関する一考察

実際の岩盤は地下水で満たされている場合が多く、岩盤の透水係数が大きければ熱水貯蔵時の温度分布に及ぼす影響も考慮する必要があると考えられる。ここでは岩盤がどの程度の透水係数であれば、温度分布に影響を及ぼすか把握するため、解析により検討することとした。

前述のように、熱水貯蔵時には空洞周辺岩盤には非定常の温度分布を生じ、それに伴う熱応力が発生し、かつ、時間と共に変化する。筆者らのこれまでの検討の結果、岩盤の透水係数は応力および温度により変化することがわかっており⁴⁾、従って、岩盤の透水係数は一様ではないと考えられる。また、岩盤に亀裂などの不連続面が存在すれば、その部分の透水性は異なる。しかし、ここでは岩盤がどのオーダーの透水係数であれば、温度分布に影響を及ぼすか概略把握することとし、岩盤の透水係数は一様であると仮定した。また、岩盤内の水の流れは等方性で Darcy 則に従うものとし、初期状態では水の流れはないものと仮定する。解析モデルは3で述べたモデルと同様ものを用い、初期状態から熱水の温度が常に 100℃一定で貯蔵した場合について解析を行う。

解析結果から貯蔵1年後の温度分布を図-9に示す。(a)は透水係数が $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ の結果である。原位置試験において最も多孔質な岩盤の透水係数がこの程度である。この場合、空洞表面付近で温度が上昇した地下水が対流し上方に移動するため、空洞の上側で温度上昇する範囲が広がっている。逆に空洞の下側では温度上昇する範囲が狭い。(b)は透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ の結果である。花崗岩岩盤において原位置試験で最も透水係数が大きい場合がこの程度である。この場合、温度分布はほぼ同心円状で熱伝導のみの解析結果とほとんど同じ温度分布となった。これらの結果より、透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以下の岩盤では特に大きな亀裂や地下水の流れがない場合には、地下水の対流現象は無視できるものと考えられる。



図－9 地下水の対流を考慮した場合の温度分布の解析結果（貯蔵１年後）

6. 結 言

本研究では地山岩盤内空洞に熱水を貯蔵した場合の温度分布について考慮した解析により検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 供試体を用いた室内貯蔵実験の結果、孔周辺の温度分布は方向に関係なく、ほぼ同心円状になることがわかった。
- (2) 岩盤空洞を想定した温度解析の結果、空洞内の熱水の温度差はあまり大きく、また、周辺岩盤の温度分布はいずれの時間においてもほぼ同心円状であり、時間の経過に伴い岩盤の温度は全体的に低下し、温度勾配も緩くなる傾向にある。
- (3) 岩盤の透水係数がある程度小さければ、地下水の対流現象はほとんど無視できることがわかった。

参考文献

- 1) Patankar S. V.; Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, p.197, Taylor and Francis, 1980.
- 2) 稲田善紀：地下の空間利用, pp.142-143, 森北出版, 1989.
- 3) 前掲 2), pp.112-119.
- 4) 稲田善紀, 木下尚樹, 中崎英彦, 上田貴夫：熱水貯蔵時の空洞の安定性と漏水に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 424/III-14, pp.227-234, 1990.