【土木学会論文集　第424号／III-14　1990年12月】

熱水貯蔵時の空洞の安定性と漏水に関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON STABILITY AND LEAKAGE OF OPENINGS DUE TO STORAGE OF HEATED WATER

稲田善紀*・木下尚樹**・中崎英彦***・上田貴夫****

By Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA, Hidehiko NAKAZAKI and Takao UEDA

For the purpose of improving the quality of life and saving enagy, heated water produced by using surplus heat from garbage-burning plant etc., will be utilized well in the near future for many purposes. To insure a stable supply, temporary storage in rock mass openings in mountain may become an important problem. In this study, stability and leakage of openings were estimated by analysis using the physical properties of rock which were obtained by experiment.

Keywords : storage, heated water, leakage, openings

1. 緒　　言

省エネルギーおよび生活の質の向上を目的として，毎日の家庭からのゴミ焼却による廃熱を利用し，水を熱水に変え，これを地域暖房，給湯システム，ビニールハウス等農業用，養魚用および融雪道路など多目的に利用することが考えられる．この場合，1日の時間帯や季節による使用量の変動に影響を受けることなく安定した供給を行うための一時的な貯蔵が必要となる．その1つの方法として地山の岩盤内に設けた空洞に直接貯蔵することが考えられる．この方法は土地の立体的有効利用ができ，周囲の環境へ及ぼす影響も少なく，岩盤が断熱材的な役目を果たすため熱水の保温効果が期待できるなどの利点をもっている．

しかし，この場合熱水を貯蔵することによって空洞周辺には温度分布が生じ，それに伴う熱応力も発生することが予想され空洞の安定性が問題となる．また，空洞からの熱水の漏れも重要な問題となる．

本研究では，熱水を貯蔵した場合の空洞周辺の温度分布を要素分割法[1),2)]を用いて計算し，これをもとに空洞周辺に発生する熱応力を求め，空洞の安定性および空洞周辺の亀裂の挙動を検討した．次に高温・高圧下における岩石の透水性を実験により求め，これを熱水貯蔵時の空洞周辺の岩盤に適応させ，熱水の漏水量を求めた結果について述べる．

* 正会員　工博　愛媛大学教授　工学部土木工学科
（〒790　松山市文京町3）
** 正会員　工修　大成建設（株）
（〒163　新宿区西新宿1-25-1）
*** 正会員　工修　（株）竹中工務店技術研究所主席研究員
（〒136　江東区南砂2-5-14）
**** 工修　（株）竹中工務店技術研究所主任研究員（同上）

2. 空洞周辺の温度分布

（1） 温度分布の計算方法

水平および鉛直方向に十分な広がりをもつ花崗岩盤の地山を想定する．土被り100 mの位置に直径10 mの円形空洞を掘削し，100°Cの熱水を直接貯蔵した場合の非定常の温度分布を，著者らが考案した要素分割法を用いて求めた．ただし，空洞周辺の岩盤は実際には湿潤状態にあると考えられるので，ここでは別の実験により求めた湿潤状態の花崗岩の熱拡散率[3)~5)]を用いて解析した．

（2） 温度分布の計算結果および考察

得られた結果をFig. 1に示す．初期の時間には急激な温度勾配を示しているが，時間の経過とともに次第に緩慢となり，温度変化も小さくなっている．貯蔵1年後の温度変化は50日間隔で約0.1°Cと非常に小さくなって

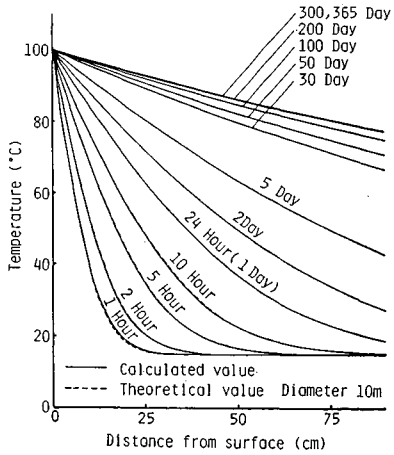

Fig. 1 Temperature distribution around openings.

おり，ここではこの状態を準定常状態とよぶこととする．なお，比較のため，ごく初期の時間に限られるが厳密解の近似式[6]で求めた温度分布を Fig. 1 に破線で示した．要素分割法で求めた温度分布との差は最大で 0.6 % であり，非常によく一致している．

3. 空洞周辺の応力解析

(1) 解析に用いた岩石の諸物性値

前述のように，地山岩盤は実際には地下水の影響により湿潤状態にある場合が多いと考えられる．したがってこのような岩盤中に熱水を貯蔵する場合の空洞周辺の応力解析を行うためには，湿潤状態における岩石の強度・変形定数および熱物性値が必要となる．これらについては著者らが別の実験によりすでに求めているので[7]，本研究ではその値を使用することとした．Table 1 はこれらのうち，大島花崗岩（愛媛県越智郡大島産）についての値をとりまとめたものである．ただし本論文では岩盤の異方性を考慮せず均質なものとして試算したことを断っておく．

(2) 解析方法

ここでは等方性弾性岩盤の地山を想定し（新鮮な花崗岩の地山を想定し，密度を 2.65 g/cm³ としている），土被り 100 m の位置に，直径 10 m の単一円形空洞を掘削し，これに熱水を貯蔵した場合について解析を行った．いずれの場合も温度分布が時間的に変化してゆくので，これに伴い熱応力も時間的に変化する．ここでは逐次破壊の現象を考慮した有限要素解析を行うこととしたが，解析にあたっては（1）で述べた岩石の諸物性値を温度分布の変化に応じて入れかえた．また，空洞に影響を及ぼさない遠い距離に境界をとる必要がある．ここでは空洞から水平，鉛直下にそれぞれ 100 m，50 m に境界をとり解析した．ここでは側圧係数（λ_0）を 0.5 として解析し，地下水位による水圧の影響は考慮していない．また，岩盤の破壊条件については種々の考え方があるが，本研究では Mohr の破壊包絡線説に従うものと考える[2),8)]．

Table 1 Physical properties of rocks used for the analysis (granite : wet).

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C)×10⁻⁶	Young's modulus (kgf/cm²)×10⁶	poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm²)	Tensile strength (kgf/cm²)
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	79
90~100	9.6	0.602	0.16	-1657	78

(3) 解析結果および考察

熱水の貯蔵前には熱応力はなく，作用しているのは地山の応力のみである．本来は空洞掘削時の発破によるゆるみ領域が予想されるがここでは考慮しないこととする．熱水の貯蔵前と貯蔵 1 年後における応力分布を比較したものが Fig. 2(a), (b) である．

Fig. 2(a) より，貯蔵前は引張応力は発生せず，圧縮応力のみが発生しており，土平において最大の圧縮応力が発生しているが，破壊判定の結果，破壊に至るような応力ではなく，空洞は安定していることがわかった．

Fig. 2(b) より，空洞周辺の温度分布が準定常状態となる貯蔵 1 年後では熱応力が重畳されるので大きな圧縮応力が発生することがわかる．ここで水平軸上に作用する半径方向の応力および接線方向の応力の経時変化を示したものが，Fig. 3 である．この図から時間の経過とともに接線方向の応力が増大していることがわかる．また，岩盤の熱膨張による空洞の変形状態を示したものが Fig. 4 である．この図から空洞は時間の経過とともに岩盤の熱膨張によりわずかながら広がりかつ円形に近くなることがうかがえる．

また，Fig. 2～Fig. 4 から空洞周辺に生じた熱膨張により，岩盤は自由面である空洞内部に張り出そうとする

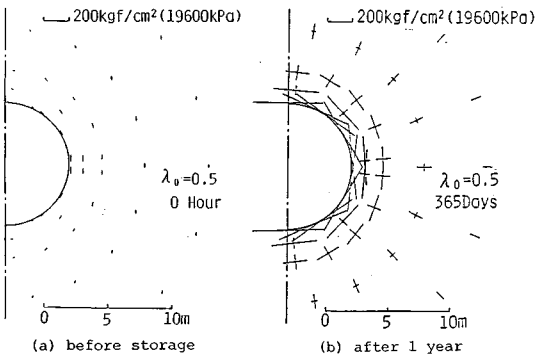

Fig. 2 Principal stress direction around openings.

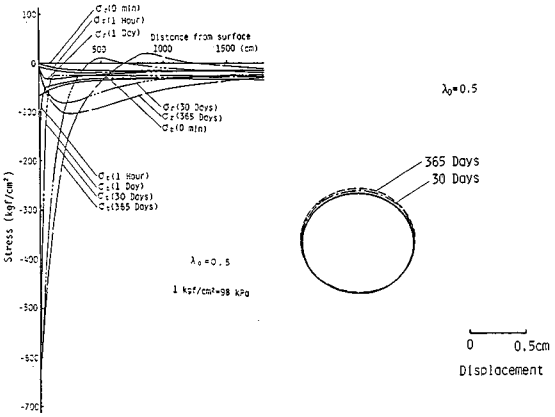

Fig. 3 Stress distribution along horizontal axis.

Fig. 4 Change of openings' shape.

が，これは空洞を逆に縮めることになり，その結果円周方向に大きな圧縮応力が生じたことが推察される．しかし，熱膨張によって空洞が収縮するのも限界があり，これを越えると逆に地山内部に向かって張り出そうとする結果，半径方向および接線方向に大きな圧縮応力が生じたものと考えられる．そして，接線方向の応力値については空洞周辺の温度分布がほぼ準定常状態になる1年後において最大となるがこれは花崗岩の圧縮強度の約2/5程度，また天端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[9]であり，前述の破壊判定の結果，熱水貯蔵後も空洞は安定していることがわかった．

4. 高温・高圧下における岩石の透水性

(1) 実験に用いた供試体

本実験に使用した岩石は愛媛県越智郡大島産の花崗岩（通称，大島みかげ）および愛媛県松山市産の花崗岩の2種類の花崗岩である．以下，前者を Granite Ⅰ，後者を Granite Ⅱ とよぶ．岩石ブロックの石の目(rift plane)の方向を弾性波伝播速度を測定することによって知り，石の目に平行な方向（“シワ”，“hardway plane” に垂直な方向）および石の目に垂直な方向がそれぞれ円柱供試体の軸方向と一致するように2種類の円柱状コアを採取し，ϕ3×6 cm に成形したものを実験に供した．端面の中心部および周辺部の高低差を 5/100 mm 以内とし，平行度，平坦度もその差が 5/100 mm 以内とした．

成形された供試体は実験に先立ち，デシケータ内で真空を併用して蒸留水に浸潤させ，これを実験に供した．試料の物理的性質を Table 2 に示した．

(2) 実験方法

本実験に使用した高温三軸透水試験装置の外観を示したものが Fig. 5 である．また，その概念図を Fig. 6 に示した．供試体の上下をポーラスメタルで挟み，周囲をゴムスリーブで被覆後セル内に装着させた．周圧，軸圧および透水圧はそれぞれ独立した圧力を保持することが必要であるので別系統の油圧を作用させ得るようになっており，その精度はおのおの設定値の±1％で制御できるようになっている．

また，供試体の加熱に際し熱衝撃による影響を避ける必要がある．3.3°C/min 以下では熱衝撃による影響がないことが報告されているが[10]，本実験では念のため 0.5°C/min 以下で昇温し，所定の温度に達した後も供試体内部まで均一の温度にするため 60 分以上保温した後，実験を行った．セル内部の温度分布を測定した結果，供試体中央部と上下端部との温度差は±1°C 以内であった．透水量については水の流れが定常状態になった後，レコーダーに記録し 2cc 以上を採取した．なお，透水係数の算定方法は Darcy の法則を適用した．

花崗岩の異方性に関しては種々の研究がなされている

Table 2 Physical properties of rocks.

	Wet			Specific gravity (Dry)	
	Porosity (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	True specific gravity	Bulk specific gravity
Granite Ⅰ	1.16	0.26	60.28	2.669	2.641
Granite Ⅱ	1.53	0.49	85.87	2.707	2.661

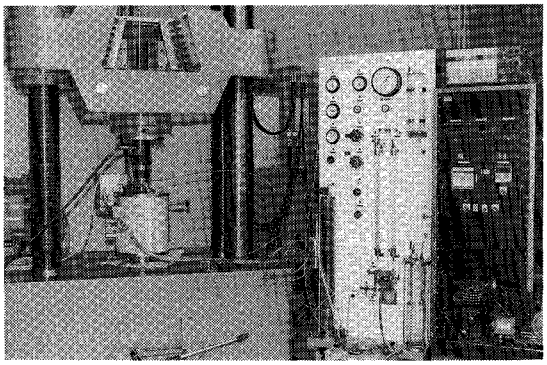

Fig. 5 External view of apparatus for measuring permeability.

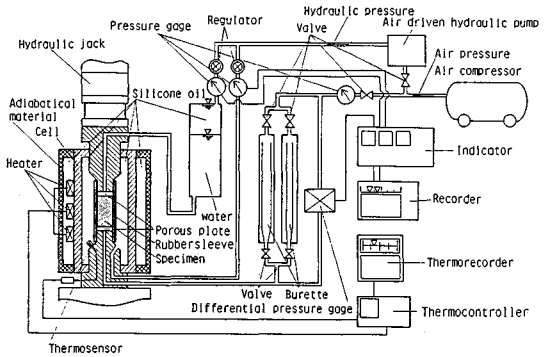

Fig. 6 Schematic diagram of the test.

が[11]，透水性にも何らかの影響を及ぼすことが予想される．本研究では，（1）で述べたとおり，石の目に平行な方向および石の目に垂直な方向に透水させて実験を行った．なお，透水性に影響を及ぼすと思われる周圧，軸圧，透水圧および温度の4つをパラメーターとして実験を行った．

（3） 実験結果および考察

実験結果をとりまとめたものが Fig. 7(a), (b)～Fig. 10(a), (b) である．ただし，ここでは石の目に平行に透水させた場合を Case Ⅰ，石の目に垂直な方向に透水させた場合を Case Ⅱ としている．

Fig. 7(a), (b) から，いずれの条件下においても軸圧の増加とともに見掛け上透水係数が減少することがわかる（以下ここではこれを透水係数とよぶこととする）．これは花崗岩が鉱物粒子の集合体として構成されていることに起因しているものと思われる．すなわち，水は構成鉱物粒子自身および粒子間に存在するマイクロクラックを流路として透水するが，軸圧の増加とともに鉱物粒子が変形し，流路を妨げたことによるものと思われる．

周圧を変化させた場合の実験結果が Fig. 8(a), (b) である．この場合も軸圧を増加させた場合と同様，透水係数は減少する傾向が認められるが，周圧の場合は軸圧の場合よりも勾配が大きいことから，透水性に大きく影響を及ぼしていることがわかる．

次に透水圧を変化させた場合の実験結果が Fig. 9(a), (b) である．これらの図から，透水圧の増加とともに見掛け上透水係数が増加していることがわかる．これは鉱物粒子自身および粒子間に存在するマイクロクラックを透水圧により拡大したり，増加させ，このため流路が拡大され流れやすくなったためと思われる．さらに，軸圧，周圧および透水圧を一定に保ち，供試体の温度を室温から90°Cの範囲で変化させた場合の実験結果が Fig. 10(a), (b) である．いずれの条件下においても温度の上昇とともに透水係数は減少している．これは，構成鉱物粒子は温度の上昇によりそれぞれ異なった体積膨張をするが，軸圧と周圧による外力により，粒子の膨張が一部は内部にも影響を及ぼし，今回の実験の範囲では結果的に流路が妨げられ，透水係数が減少したものと考えられる[12]．

以上の結果から，今回の実験の範囲では花崗岩の透水

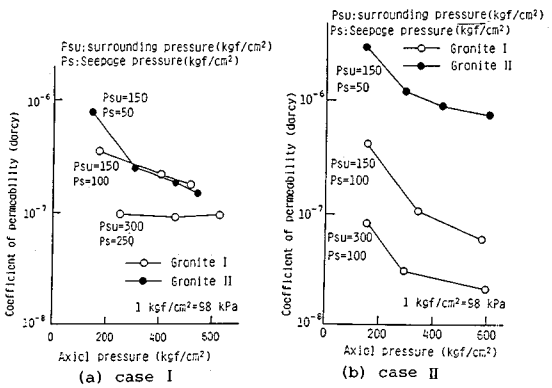

Fig. 7 Effect of axial pressure on permeability.

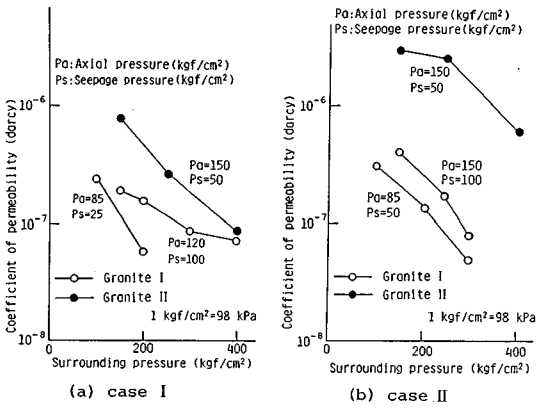

Fig. 8 Effect of surrounding pressure on permeability.

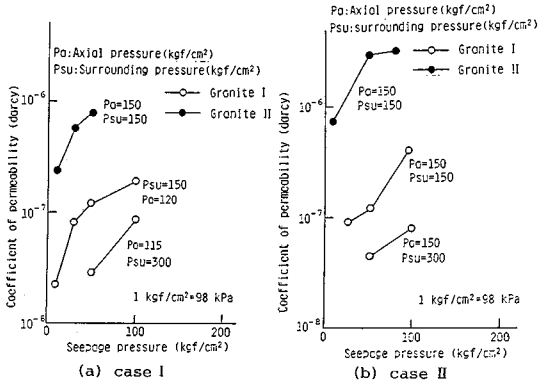

Fig. 9 Effect of seepage pressure on permeability.

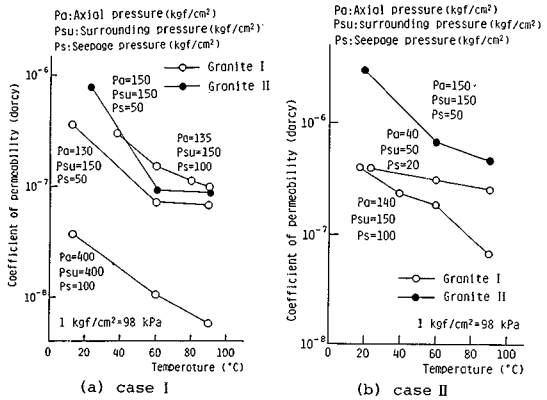

Fig. 10 Effect of temperature on permeability.

性は周圧，透水圧および温度の影響を大きく受け，軸圧の影響もわずかながら受けることがわかった．また，異方性が透水性に及ぼす影響は，Granite Ⅰを用い軸圧を変化させた場合にわずかながらみられたが，それ以外の場合にはほとんど認められなかった．

5. 熱水貯蔵時における岩盤の透水性

(1) 透水係数の簡易推定式

地山岩盤内に設けた空洞に熱水を貯蔵した場合には空洞周辺の岩盤に温度分布が生じ，また，それに伴い応力分布が生じる．これらは時間の経過とともに変化し，同時に透水係数も変化する．すなわち，熱水の漏水量も時間的に変化してゆくと考えられるので，これらを解析するためには種々の状態に対応した透水係数を容易に推定できなければならない．そこで，4. で述べた実験結果に基づき，軸圧，周圧，透水圧および温度を変数とする透水係数の簡易推定式を導くこととした．ただし，以下の式はそれぞれの変数を単に数値的に取り扱っているにすぎず次元的には関連性がないことを断っておく．

Granite Ⅰの石の目に平行に透水させた場合（Case Ⅰ）の実験結果から求めたものを式（1）に示す．

$$\log K=(-6\,340-0.56\,P_a-3.4\,P_{su}+3.4\,P_s-5.2\,T)\times10^{-3}\quad\cdots\cdots(1)$$

また，石の目に垂直に透水させた場合（Case Ⅱ）の実験結果から求めたものを式（2）に示す．

$$\log K=(-6\,100-1.6\,P_a-3.7\,P_{su}+4.7\,P_s-5.4\,T)\times10^{-3}\quad\cdots\cdots(2)$$

さらに，Granite Ⅱの石の目に平行（Case Ⅰ）および垂直（Case Ⅱ）に透水させた場合の実験結果から求めた式をそれぞれ式（3）および式（4）に示す．

$$\log K=(-5\,500-1.7\,P_a-3.9\,P_{su}+7.8\,P_s-13.2\,T)\times10^{-3}\quad\cdots\cdots(3)$$

$$\log K=(-5\,500-1.0\,P_a-1.5\,P_{su}+5.9\,P_s-7.9\,T)\times10^{-3}\quad\cdots\cdots(4)$$

ただし，K：透水係数（darcy），P_a：軸圧（kgf/cm²），P_{su}：周圧（kgf/cm²），P_s：透水圧（kgf/cm²），T：温度（°C）．

なお，この場合の式（1）～（4）の重相関係数はそれぞれ0.85，0.95，0.90，0.87であった．

(2) 空洞周辺岩盤の透水性の経時変化

周知のとおり岩石の透水係数と岩盤のそれとは実際には亀裂などの影響により大きく異なっているが，ここでは岩盤が均質なものとして試算してみる．

前述の推定式（1）を用い単一円形空洞の場合の貯蔵前の透水係数を基準とした場合の熱水貯蔵開始から1年後までの透水係数比の変化を示したものが Fig. 11 である．Fig. 11 から，空洞表面近くでは初期の時間から急激に透水係数が減少し，貯蔵1日後には貯蔵前の1/30となり，時間の経過とともに減少の範囲が地山に向かって広がる．貯蔵1年後には，Fig. 12 に示すように空洞表面近くでは1/50となっている．

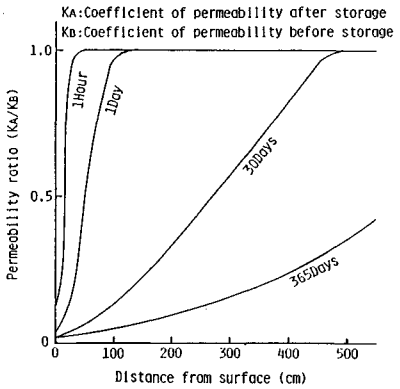

Fig. 11 Temporal change of permeability ratio.

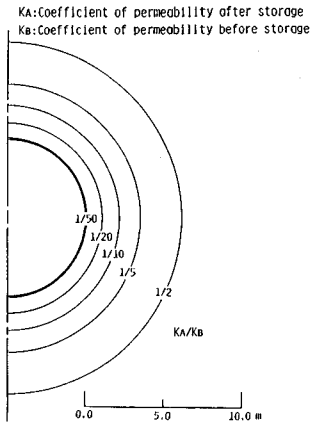

Fig. 12 Permeability distribution around opening.

実際には水の粘性は15～100°Cで約1/4になることが知られているので[13]，このことを考慮しても空洞表面付近の透水性は貯蔵前の約1/10になるものと思われる．

また，多量の熱水を貯蔵しておく必要がある場合や，地山の地形や地質などの諸条件によって複数の空洞を設けた方が有利な場合が考えられる．ここでは，直径を10 mの円形空洞とし，空洞表面間距離がそれぞれ①20 mおよび②10 mの双設空洞とした場合，および③多設空洞とし，空洞表面間距離が10 mで水平方向に一列に配置した場合の透水性の変化を求めた．①の場合の透水性の経時変化をとりまとめたものが Fig. 13(a), (b) である．貯蔵の初期の時間から隣接空洞側，その反対側および空洞の上下部分のいずれの場所においても透水係数は急激に減少し，貯蔵30日後で隣接空洞側およびその反対側で約1/40，空洞の上下部分で約1/50になることがうかがえる．貯蔵1年後では Fig. 14(a) に示すよう

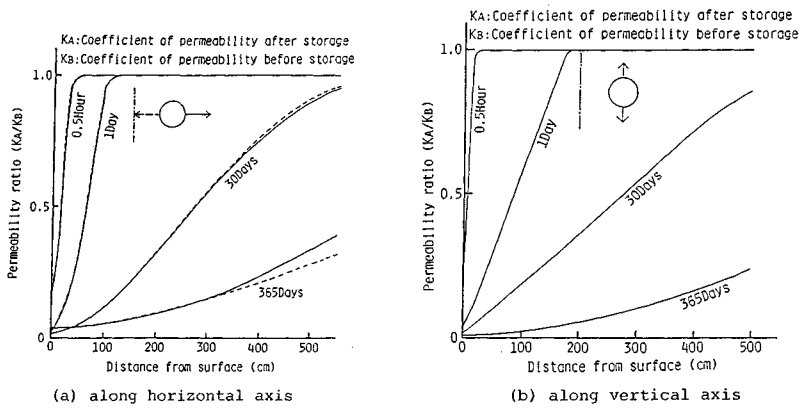

Fig. 13 Temporal change of permeability ratio.

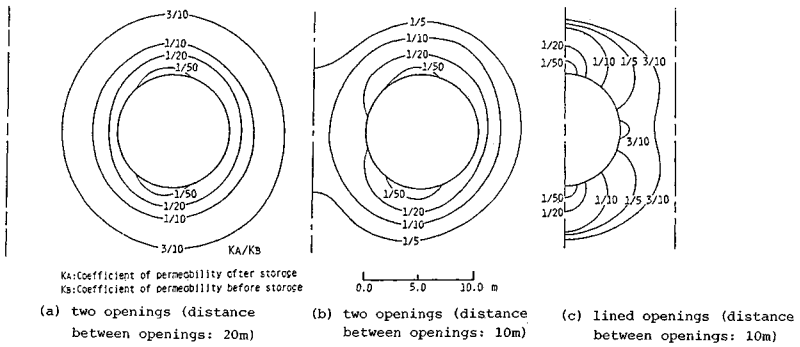

Fig. 14 Permeability distribution around openings.

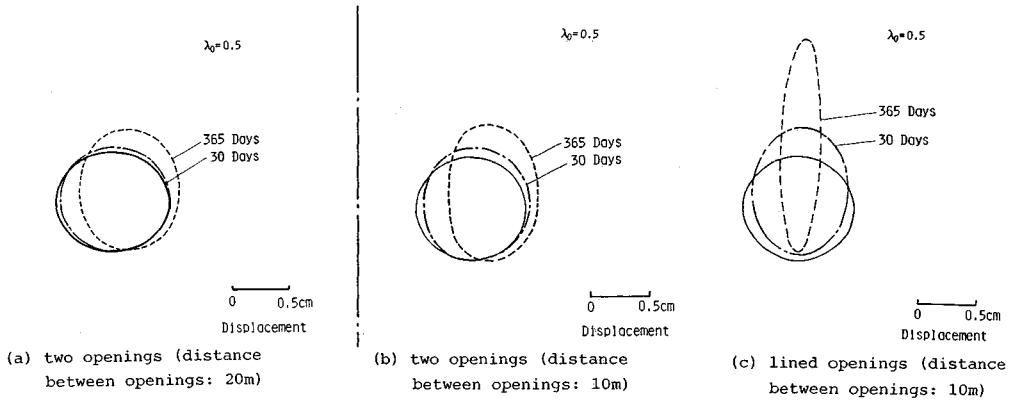

Fig. 15 Change of openings' shape.

に空洞の上下部分では約 1/60 となるが，水平軸方向は逆に緩和され約 1/25 になる．これは熱膨張により隣接空洞が互いに影響を及ぼしまた及ぼされることにより，Fig. 15(a) に示したように変形し，接線方向の圧縮応力が逆に緩和されたことに起因しているものと思われる．

次に，②の場合の貯蔵 1 年後の透水性の分布を Fig. 14(b) に示す．空洞表面付近の透水係数比は隣接空洞間側で約 1/15，その反対の外側で約 1/25 となる．また，空洞の上下部分では約 1/70 となることがうかがえる．このことは Fig. 15(a), (b) に示した変形状況を比較してもわかるように Fig. 15(b) の方が変形が大きく，したがって緩和される量も大きいことに起因してい

るものと思われる．

③の場合の結果を示したものが Fig. 14(c) である．空洞表面付近においては土平の部分で貯蔵前の約 1/3 にまで緩和されているが，空洞の上下端の部分では約 1/150 となる．

以上のように複数の空洞を設け，熱水を貯蔵した場合には，Fig. 15(a)～(c) のように空洞が変形し，土平付近の接線方向の圧縮応力が逆に緩和されることによって，その部分の透水係数が貯蔵初期に比べ大きくなることがわかった．この傾向は空洞を水平一列に配置した場合に最も大きくみられ，次いで双設空洞（空洞表面間距離 10 m）の場合，双設空洞（空洞表面間距離 20 m）の場合の順にみられる．

以上の透水係数を用いて空洞からの熱水の漏水量を試算してみる．ただし，地山中の地下水および水位を考慮していないことおよび単に空洞表面付近の岩盤の透水係数のみを用いて試算していることを断っておく．ここでは貯蔵開始からの全漏水量を空洞の容量に対する割合として表わすこととした．得られた結果を Fig. 16 に示した．1 年後までの漏水量は単一空洞で 1.78 %/年，双設空洞では空洞表面間距離が 20 m の場合で 1.87 %/年，10 m の場合では 1.96 %/年となる．双設空洞では隣接空洞の影響を受けてはいるものの単一空洞との差はあまり大きくない．空洞を水平一列に配置した場合には 4.23%/年と単一空洞と比べて約 2.4 倍の漏水量となるが，これは隣接空洞の影響を受けて変形し，特に土平付近の岩盤の透水係数が単一空洞の場合のそれと比較して大きくなったためと考えられる．いずれにしても漏水量はせいぜい 2～4 %/年程度であり，今回の試算の結果からは，熱水の漏れは量的にはほとんど無視できるものと思われる．

6. 空洞周辺の亀裂の挙動

3.(3) ですでに述べたように，今回行った解析の範囲では空洞は熱水の貯蔵に対し，安定していることがわかった．しかし，実際には，空洞周辺の岩盤には亀裂が存在しているものと考えられ，空洞の安定性や液漏れ対策上，熱水貯蔵時の亀裂の挙動を知る必要がある．

そこで，前述の温度分布や応力解析の場合と同様に，土被り 100 m の花崗岩の地山岩盤中に直径 10 m の円形空洞を設け，熱水を直接貯蔵した場合を想定し，温度分布は要素分割法を用い，また，応力分布は有限要素法を用いて解析を行い，空洞周辺に存在する亀裂の挙動を求めることとした．ただし，実際には亀裂の方向，数，大きさはそれぞれの地山によって異なるので，亀裂の挙動がわかりやすいように幅 3 cm，長さ 5 m の亀裂が空洞の半径方向に等間隔に水平に二次元的にそれぞれ 2 本，4 本および 8 本存在していると仮定した場合の 3 通りのモデルを（Fig. 17 参照）想定し，亀裂の数が挙動に及ぼす影響を求めた．

熱水が亀裂内に浸入することによって，亀裂付近の温度分布に乱れを生じるが，いずれの場合にも空洞周辺の温度分布は貯蔵 1 年後には準定常状態となる．この温度分布を用いて有限要素法により空洞周辺に発生する熱応力を計算し，亀裂の変位を求めた．その結果，いずれの場合においても空洞周辺の岩盤が熱により膨張することによって亀裂がふさがる方向に変位していることがわかった．

空洞表面における亀裂の円周方向の変位を Fig. 17 に示す．亀裂 1 本当たりの変位は，2 本および 4 本設けた場合で円周方向に約 1 cm，8 本の場合では約 0.6 cm となり，亀裂 1 本当たりの変位量は今回の条件では最大 1 cm 程度であり，亀裂が多くなるとともに 1 本当たりの変位量は減少することがわかった．

また，すべての亀裂の変位の総和は，2 本の場合で約 2 cm，4 本の場合で約 4 cm，8 本の場合で約 4.7 cm となり，亀裂の本数が増えるにつれて大きくなっているが，2 本から 4 本で約 2 倍の変位量の増加であるのに対し，4 本から 8 本では約 1.2 倍の増加であり，増加の割合が少なくなっている．このことから変位量の増加にも限度があることがわかる．これは前述のように亀裂内に熱水が入ることによって亀裂周辺の温度分布が乱れるが，温

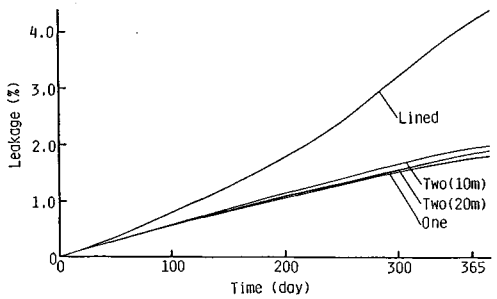

Fig. 16 Leakage from the openings.

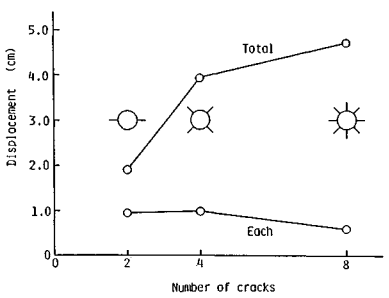

Fig. 17 Displacement of the crack at the surface of openings.

度分布が準定常状態となる1年後において温度分布の到達範囲はいずれの場合においても約20 mであり，亀裂の数が増えても温度分布そのものに限界があり，このことが変位の限界となって現われたものと思われる．

7. 結　　論

本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである．

（1） 熱水を貯蔵した場合には空洞周辺の温度分布は初期の時間には急激な温度勾配を示すが，時間の経過とともに次第に緩慢となり，1年後には準定常の状態となる．

（2） 空洞に熱水を貯蔵した場合，空洞の周辺には熱応力が発生し，貯蔵1年後には単一空洞の場合では土平付近の接線方向の圧縮応力が最大となるが，空洞は安定している．

（3） 花崗岩の透水性に影響を及ぼすと思われる，軸圧，周圧，透水圧および温度をパラメーターとして透水試験を行った結果，今回の実験範囲では透水性は周圧，透水圧および温度の影響を大きく受け，軸圧の影響は小さい．

（4） 花崗岩の異方性が透水性に及ぼす影響としては，今回使用した花崗岩においては軸圧の影響を受けた場合に透水性に差がわずかながらみられたが，周圧，透水圧および温度をそれぞれ変化させた場合にはほとんど差が認められず，異方性が透水性に及ぼす影響は小さいことがわかった．

（5） 空洞周辺岩盤の透水性を求めるため，実験結果に基づき軸圧，周圧，透水圧および温度を変数とする透水係数の簡易推定式を見出した．

（6） （5）で得た推定式を解析により求めた時間とともに変化する温度分布および応力状態に適用し，空洞周辺岩盤の透水性を求めた結果，1年後には単一空洞の場合は貯蔵前の1/50，複数空洞とした場合，貯蔵30日後から1年後の間で土平付近において逆に緩和され，貯蔵前の透水係数の1/25～1/3程度となることがわかった．

（7） 貯蔵開始から温度分布が準定常状態となる1年後までの空洞からの漏水量を試算した結果，単一空洞の場合は空洞容量の1.78 %，多設空洞の場合は約2～4 %であり，今回の試算からは熱水の漏れは量的にはほとんど無視できることがわかった．

（8） 空洞周辺の亀裂の挙動を解析した結果，空洞周辺の岩盤が熱により膨張することによって亀裂がふさがる方向に変位し，熱水の防止にある程度の期待がもてることがわかった．また，亀裂1本当たりの変位量は，亀裂の数が多くなると減少し，亀裂の長さが長くなると増加するが，総変位量は亀裂数が増加してもある限界以上は増加しないものと思われる．

参 考 文 献

1) 稲田善紀・重信　純：液化天然ガスを地下岩盤内空洞に貯蔵した場合の空洞周辺の温度分布，日本鉱業会誌，第99巻，第1141号，pp. 179～185，1983.
2) 稲田善紀・北村聖一・岡田明浩：LNGの地下岩盤内空洞貯蔵における空洞の安定性の検討，土木学会論文報告集，第343号，pp. 35～44，1984.
3) 稲田善紀・真鍋孝信：熱水の地下岩盤内貯蔵に関する研究，第1回計算力学シンポジウム論文集，pp. 291～298，1987.
4) 稲田善紀・真鍋孝信・大橋俊太郎・吉川雅章：熱水の地下貯蔵による空洞の安定性，第7回岩の力学シンポジウム講演論文集，pp. 407～417，1987.
5) 稲田善紀・真鍋孝信：熱水の影響を受けた空洞の安定性，愛媛大学工学部紀要，第11巻，第3号，pp. 223～235，1988.
6) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C.：Conduction of Heat in Solids, Oxford at the Clarendon Press, pp. 335～336, 1959.
7) 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，第370号／Ⅲ-5，pp. 217～223，1986.
8) 稲田善紀・谷口浩二：液化天然ガスの地下岩盤内空洞貯蔵による空洞周辺の塑性領域，日本鉱業会誌，第103巻，第1192号，pp. 365～372，1987.
9) Inada, Y. and Sterling, R. L.：Storage of Heated Water in Underground Openings, Proc. J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 597～614, 1989.
10) 山口梅太郎・宮崎道雄：熱による岩石の強度の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌，第86巻，第986号，pp. 346～350，1970.
11) 工藤洋三・橋本堅一・佐野　修・中川浩二：花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布，土木学会論文集，第370号／Ⅲ-5，pp. 189～198，1986.
12) 稲田善紀・木下尚樹・中崎英彦・上田貴夫：熱水の岩盤内多設空洞貯蔵，地下空間利用シンポジウム1989論文集，pp. 77～82，1989.
13) たとえば国立天文台編：理科年表，pp. 446～447，丸善，1988.

（1990. 4. 23・受付）