

長期熱水浸漬下における花崗岩の物性変化

鈴木 健一郎 桑原 徹
丸山 誠 平間 邦興

Material Property Changes of Granite under Long-Term Immersion in Hot Water

Ken-ichiro Suzuki Tohru Kuwahara
Makoto Maruyama Kunioki Hiramata

Abstract

To understand changes in properties with time due to temperature and subsurface flow as well as hydraulic and mechanical properties themselves of rock masses is an important consideration in the assessment of long-term stability of underground caverns. The temperature condition was simulated in a 90°C water bath and the time dependence of material properties of granite was investigated. Little changes in permeability and P-wave velocity took place in a short period of time, but a marked increase of permeability was found at about 1,000 days of immersion. This was attributed to the change of microfabric due to microcrack growth and subsequent chemical alteration.

概 要

近年、わが国ではアメニティ豊かな空間の創造および環境保全の立場から多面的な地下空間の利用が叫ばれている。大深度岩盤内空間利用に伴う地盤環境を予測するためには岩盤に関する基礎情報を収集することが必要と考えられる。岩盤の長期的な安定評価のためには、力学的および水理学的特性の把握とそれらへの熱の影響を考慮し、物性の長期的な変化を推定することが必要となる。本研究は花崗岩を対象として、熱水環境下で長期間浸漬した場合の岩石の物性、特に透水特性と弾性波伝播速度の変化を実験的に調べたものである。

地下岩盤における拘束条件、地下水の化学的活性度等の条件の違いはあるが、結論として、短期的には物性の変化は小さいが、1,000日浸漬により弾性波速度は70%の低下、透水係数は4オーダー程度の増加が見られた。これらは主に物理的な劣化に起因するが、化学的な変質も同時に進行していることが認められた。

1. はじめに

近年、我が国ではアメニティ豊かな空間の創造および環境保全の立場から多面的な地下空間の利用が叫ばれている。大深度岩盤内空間利用に伴う環境を予測するためには岩盤に関する基礎情報を収集することが必要となる。力学的および水理学的特性の把握の他、それらへの熱の影響を考慮し、長期的な変化を推定する必要もあると考える。岩石物性の温度依存性については様々な形で議論されているが、一定温度下での時間に依存した長期的な物性変化についての議論はほとんどなされていないのが現状である。本研究は特に我が国に広く分布し、構造物の基礎や地下空洞の構造体として用いられることの多い花崗岩を対象として、熱水環境下での透水特性と弾性波伝播速度の長期間の時間的な変化を実験的に調べたものである。

地下深部の岩盤における環境を実験的に模擬する上で

重要となるパラメータとしては、温度、地下水流速、地下水の Eh (酸化還元電位) や pH (水素イオン濃度) 等の化学的性質、拘束圧力等があげられる。今回の報告では地下水存在下での温度の岩石物性への影響に注目し、無拘束の状態ですら3年間にわたり熱水中に供試体を浸漬させて実験環境を模擬した。その間経時的に弾性波伝播速度および透水係数を測定し、劣化の状況を観察した。以下に実験手法および計測・観察結果について述べる。

2. 試料および実験方法

実験に用いた試料は、茨城県笠間産の黒雲母花崗岩であり、主たる試験項目は単位体積重量、間隙率、弾性波速度、透水係数である。それらの初期値を表一にまとめた。供試体は直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱である。熱水槽 (写真一) は内蔵のマイコンにより昇温・降温速度および一定保持温度を設定できるもので、熱水は水道水を用いている。熱水の温度は花崗岩の造岩鉱物

の中でも粘土化しやすい斜長石が常圧下で80~90°C程度の温度で生成されることなどを考慮し、90°Cとした。

実験の手順は以下の通りである。

① 供試体作成後、透水係数および弾性波速度の測定を行い、それらを浸漬前の初期値とした。

② 初期値の設定された供試体を熱水槽中に水浸させる。

③ 昇温速度を熱衝撃による破壊¹⁾が生じないように2°C/minに設定し、一定保持温度90°Cまで上昇させ、所定の期間浸漬を行う。

④ 養生期間は2日、10日、40日、180日、670日および1,030日である。

⑤ 所定の期間浸漬の行われた供試体を熱水槽より取り出す際は、昇温時と同様、急激な温度降下のないように一旦熱水の入った別の容器に移し、そのまま室温相当になるまで放置した。

⑥ 湿潤重量、乾燥重量、透水係数(注水温度および雰囲気温度は共に室温相当)および弾性波速度の測定を行う。

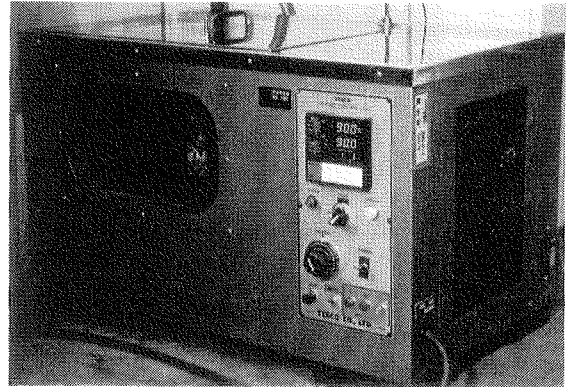
⑦ 上記を測定後、顕微鏡観察用供試体を除いて再び熱水槽に再浸漬させる。この時、熱水養生槽には直接戻さず、水中からある程度時間をかけて温度を上げた後に熱水槽に戻した。以上のように急激な温度変化による供試体への熱衝撃が作用しないように注意した。

⑧ 浸漬期間中は槽内の熱水の交換は行わない。したがって、花崗岩供試体より溶脱された成分は熱水中に蓄積する。蒸発により水道水の補給があり、定量的な議論はできないが、熱水中への溶脱成分の定性的検討を行うために800日および1,200日の水質分析を行った。(比較試験として使用した水道水の水質分析も行った。)

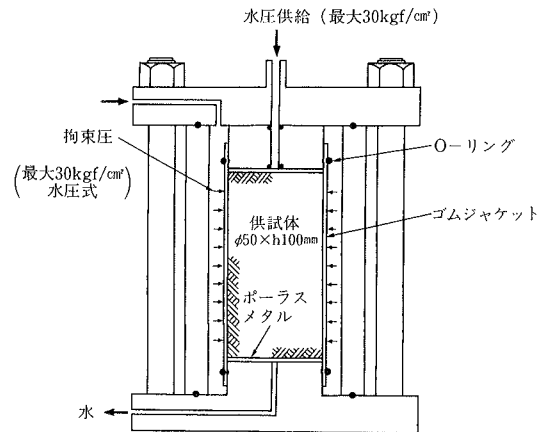
⑨ 養生期間180日、670日および1,030日の供試体については、マイクロクラックの進展状況を顕微鏡観察するための薄片作成およびX線分析を行い、必要に応じて走査・透過電子顕微鏡写真の撮影を行った。

表一 浸漬前の物性一覧

	単体重量 g/cm ³	間隙率 %	透水係数 cm/sec	乾燥Vp km/sec	湿潤Vp km/sec
平均	2.61	0.75	1.84×10 ⁻⁹	4.33	5.13
標準偏差	0.01	0.17	1.84×10 ⁻⁹	0.57	0.76



写真一 熱水槽

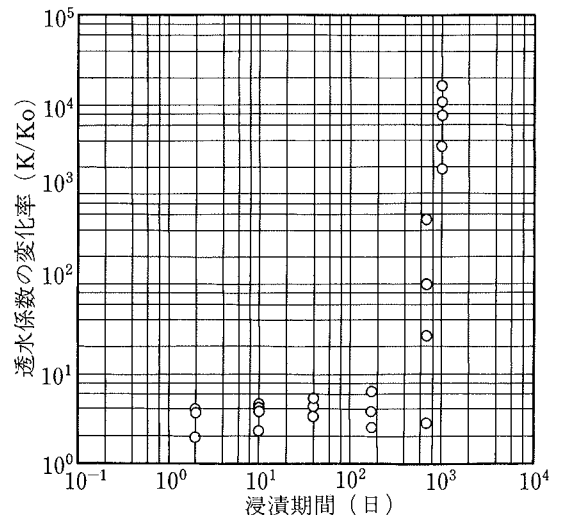


図一 岩石用一様流型透水試験装置

3. 実験結果および考察

3.1 物性の時間的変化に関する考察

3.1.1 透水係数の変化 透水試験は拘束圧 5 kgf/cm²、透水圧 3 kgf/cm² で供試体の上端から下端へ浸透させる一様流型の試験である。(図一)熱水槽より取り出した供試体は一旦室温まで温度を下げて試験を行った。浸透水もほぼ室温である。図二に透水係数の時間的な変化を示す。横軸は浸漬日数を対数で、縦軸は浸漬前の透水係数により無次元化した透水係数の変化率を対数でとっている。透水係数の初期値は10⁻¹⁰~10⁻⁹ cm/secであるが、浸漬2日以降は全て10⁻⁹ cm/secとなり、180日までほとんど変化しない。ところが670日の浸漬期間を経た供試体では10²も大きくなるものが現れ始めた。1,030日を経ると全てが10³~10⁴大きくなっている。すなわち、短期的には熱水の影響でわずかに透水性が増加しその後余り変化しないが、600日程度浸漬を行うと新たな変化が



図二 透水係数の経時変化

起こり始め、急激に透水係数が増加することが明らかとなった。

3.1.2 弾性波伝播速度の変化 図-3に弾性波伝播速度の経時的な変化を示す。図-2と同様、横軸は浸漬日数を対数で、縦軸は養生前の弾性波速度で無次元化した弾性波速度(P波速度)の変化率をとっている。○印で示したものは透水試験後に室内で自然乾燥させた状態で測定した弾性波速度、●印は透水試験前の飽和状態で測定した弾性波速度をそれぞれ示している。P波速度は水の影響を受けるため●印のものはほとんど変化しないが、1,000日養生のものは多少減少している。また、○印のものは浸漬期間の短いものから浸漬日数に伴う減少傾向がみられ、1,000日浸漬では60%まで減少している。

3.1.3 間隙率の変化 初期の間隙率は表-1に示したように平均0.75%であり、その後ほとんど変化はないが、1,000日浸漬のもので平均1.68%となり、明らかに間隙が増加している。間隙率と浸漬日数との関係を図-4に示す。この関係には透水係数の時間変化と同様な急激な上昇が見られる。間隙率と透水係数の相関性をとると図-5の様に比較的良好な関係が示される。透水係数の変化は供試体の間隙率の変化に起因するものであることが確認された。

3.2 風化・劣化の進行に関する考察

透水係数や弾性波伝播速度などの物性の時間的変化は岩石の風化・劣化の進行に起因するものと考えられる。ここで、風化とは気象・水文等の自然環境条件下での物質の変化、劣化とは人工的な条件下でも用いられるものとして定義される。模擬した実験環境は両者を考慮したという意味で風化・劣化という言葉を用いることとする。岩石の風化・劣化は物理的な要因によるものと化学的なものがあり、通常これらは相互に依存した形で風化・劣化を進行させる。ここでは鉱物中のクラックの進展を物理的な要因によるもの、鉱物の変質・粘土化を化学的なものに分けて考察を行う。

3.2.1 物理的風化・劣化の進行 物理的な風化・劣化の要因は応力の作用によるもので、今回の実験の場合は熱応力による鉱物内のクラックの進展である。マイクロクラック観察用の薄片を図-6に示すような3方向、5試料作成した。①、③、⑤は供試体端部と内部でのマイクロクラックの分布の違いを調べるために、②および④はX面およびY面での分布の違いを調べるためのものである。写真-2および図-7に670日養生の顕微鏡写真およびクラックトレース図を、写真-3および図-8には1,030日養生の結果を示す。クラックの発生は主に石英と他の鉱物との境界において起こり、内部に進展し、更に横断する形で進行しており、その傾向は一部斜長石にもみられる。クラックの発生量や方向を次式にしたがってクラックテンソル²⁾を用いて表した結果をそれぞれの図に併記した。

$$F_{ij} = \sum r^2 n_i n_j / A$$

ここに r はマイクロクラックの長さ、 n_i はその法線ベク

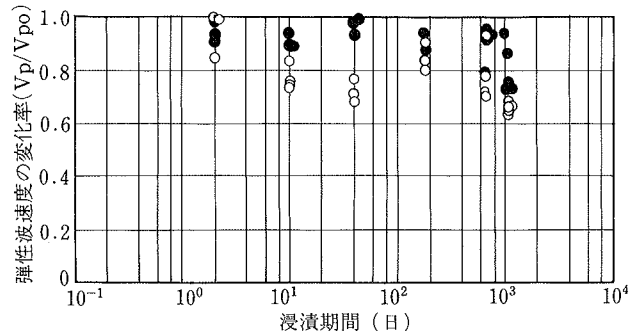


図-3 弾性波速度の経時変化

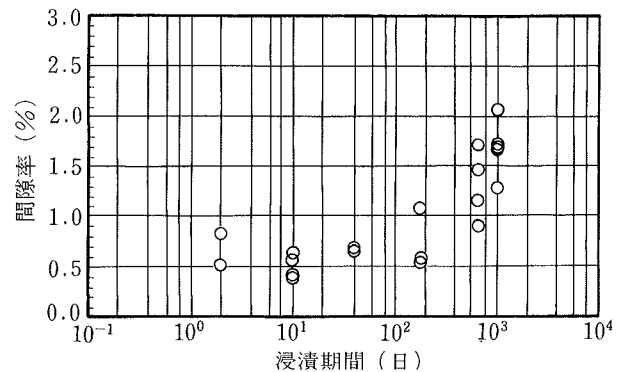


図-4 間隙率の経時変化

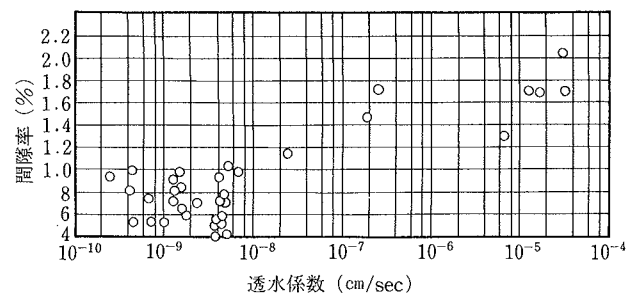


図-5 間隙率と透水係数の相関関係

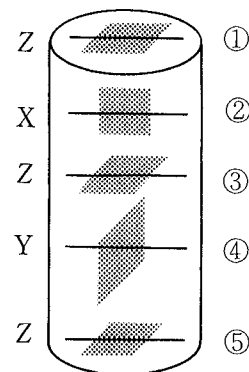


図-6 偏光顕微鏡観察用薄片作成断面位置

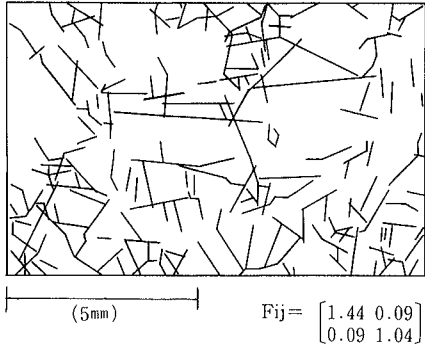


図-7 マイクロクラクトレース図 (670日浸漬)

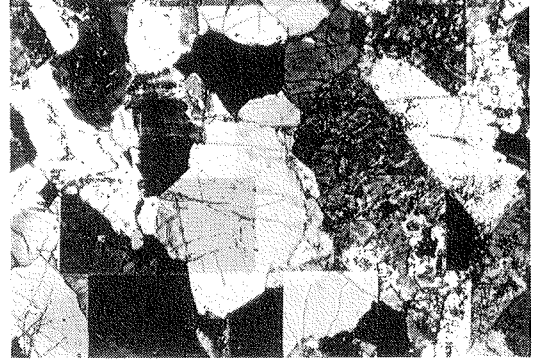


写真-2 偏光顕微鏡写真 (670日浸漬)

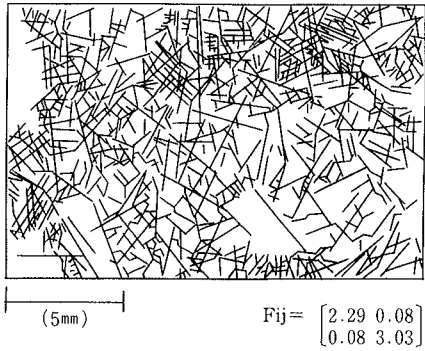


図-8 マイクロクラクトレース図 (1,030日浸漬)

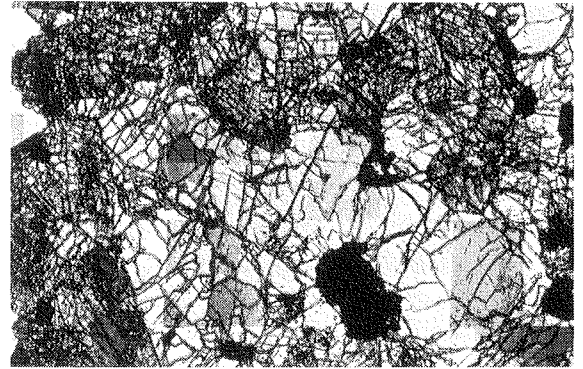


写真-3 偏光顕微鏡写真 (1,030日浸漬)

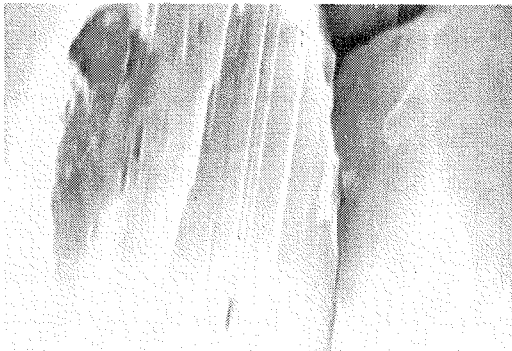


写真-4 走査電子顕微鏡写真
(浸漬無し, 新鮮斜長石)



写真-5 走査電子顕微鏡写真
(1,030日浸漬, 斜長石)

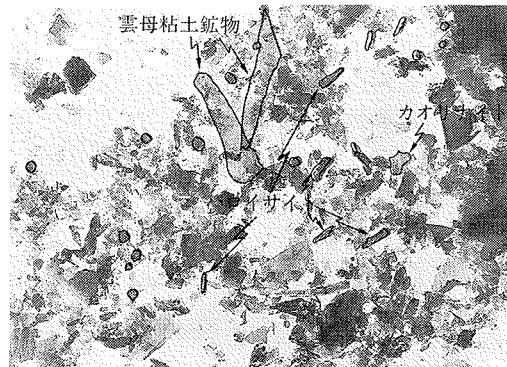


写真-6 透過電子顕微鏡
(1,030日浸漬斜長石)

トルである。供試体中の薄片を作成した位置および方向に関する依存性がみられず、ほぼ等方的であるといえる。また、浸漬前に認められる新鮮な斜長石が、1,030日浸漬後のものでは粘土化して薄汚れた形態を示すような変化を生じていることも確認された。

偏光顕微鏡で認められるような変化は、走査電子顕微鏡 (SEM) でも認められる。ここでは後述する溶脱の対象と考えられる斜長石について検討を行った。浸漬期間0日と1,030日のSEM映像 (写真-4, 5) を見ると0日では斜長石の表面は極めて滑らかで特別な変化も見られないが、1,030日後では明瞭なマイクロクラックが認められ、表面は不規則、凹凸に富み、一部不純物・異質物の付着も認められた。

以上のように岩石内において微小構造の物理的な変化が時間的に進行し、それが透水性に大きな影響を与えていることが確認された。

3.2.2 化学的風化・劣化の進行 走査電子顕微鏡で認められた不純物が実験により新たに生成された鉱物かどうかを検討するため、透過電子顕微鏡 (TEM) で分析を行った。その結果、実験前には認められなかったチューブ状・針状および円形の鉱物が多数識別され (写真-6), これら鉱物を形態学的に同定を行ったところチューブ状・針状の鉱物はハロイサイト、円形状のものはその初生的なものであると判断された³⁾。このハロイサイトを結晶構造的に確認するために X 線分析を実施した。この時、斜長石に比べてハロイサイトの含有量が非常に少ないので、変質した試料を超音波洗浄器にかけた後、さらに遠心分離機を用いて分析用の試料を調整した。図-9に X 線分析結果のチャートを示すが、石英、斜長石、正長石、雲母および少量のハロイサイト、ノントロナイトが確認された。

水質の変化から供試体よりの溶脱の有無およびその成分を調べるために800日および1,200日後の熱水槽中の熱水の水質分析を行った。計量結果を表-2に示す。花崗岩は主に石英、斜長石、黒雲母からなり、それらの一般式はそれぞれ SiO_2 , $(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al} (\text{Si}, \text{Al}) \text{Si}_2\text{O}_8$, および $\text{K} (\text{Mg}, \text{Fe})_3 \text{AlSi}_3\text{O}_{10} (\text{OH})_2$ である。シリカ、ナトリウム、カリウムおよびカルシウムが1,200日後の熱水で5倍にも増加していることから溶脱は明らかに起こり、それらは時間と共に増加していることが確認された。これは一般的な花崗岩の風化に際して生じる現象と同様である。マグネシウムのバラツキは試料中の雲母含有量のバラツキと考えられる。塩素の増加については、花崗岩中に塩素を含む鉱物として長石、角閃石、雲母、アパタイト、ホタル石などのハロゲン化鉱物があるが、水道水に浸漬しているために定量的な判断は困難である。

以上のような試験結果から、花崗岩中の斜長石から3年間の熱水浸漬によりアルカリ成分が溶脱し、斜長石からハロイサイトが変質・形成されていることが明らかとなった。岩石風化の時間スケールと比較して非常に短期間にこれらの進行が認められたことは興味深い。

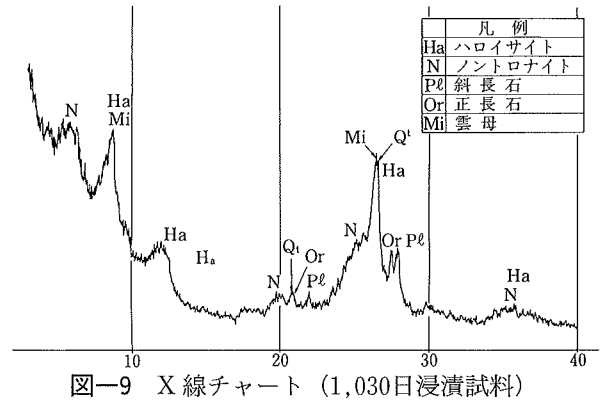


図-9 X線チャート (1,030日浸漬試料)

表-2 水質分析結果一覧表

項目	単位	水道水	800日	1,200日	計量方法
ナトリウム	mg/l	8.73	29.1	44.8	JIS K0102.48.1
カリウム	mg/l	1.28	3.68	6.78	JIS K0102.49.1
カルシウム	mg/l	16.2	24.5	95.1	JIS K0102.50.2
マグネシウム	mg/l	5.70	5.26	0.18	JIS K0102.51.2
塩素イオン	mg/l	21	47	76	JIS K0102.32.2
硫酸イオン	mg/l	2.1	5.0	17.5	JIS K0102.41.1
重炭酸イオン	mg/l	64.9	20.8	113	鉱泉分析法
全シリカ	mg/l	42.7	54.0	115	JIS K0102.44.3

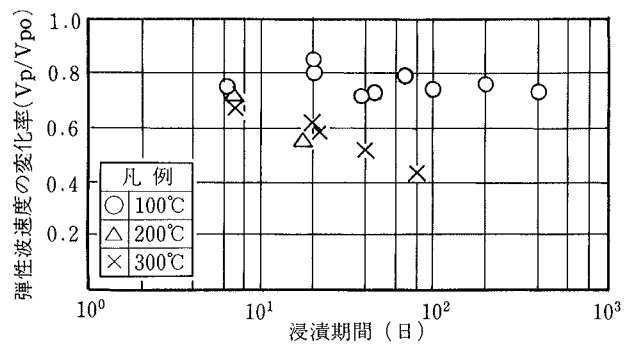


図-10 弾性波伝播速度の経時変化

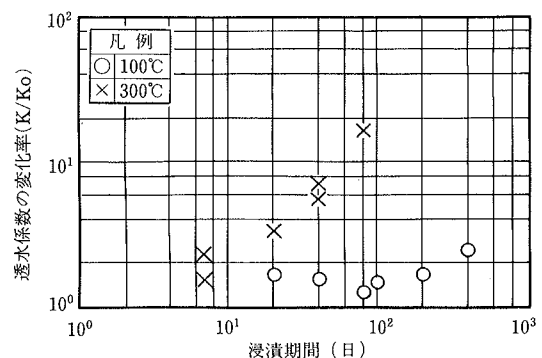


図-11 透水係数の経時変化

3.3 高温雰囲気下での実験結果との比較

高温雰囲気下での実験結果は水の有無による物性の時間的変化の違いを検討するのに有効である。実験は加熱炉において100°Cで最長400日まで行った。詳細は文献²⁾を参考されたい。弾性波速度の変化率および透水係数の変化率をそれぞれ図-10および図-11に示す。弾性波速度の変化は熱水中でも高温雰囲気下でもほぼ同じ傾向を示すが、透水性については400日程度までは熱水浸漬の方が変化が大きくなっている。これは吸水によるマイクロクラックの拡大が原因であると考えられる。このように比較的短期間では熱水の存在下での各物性の劣化は化学的な要因によるよりも力学的な要因、すなわち、各鉱物の熱膨張率の差が原因となるクラックの進展によるものであることが示唆される。熱水浸漬におけるその後の透水性の増加については化学的な要因の影響によるものと判断される。

4. 結論

結論を述べる前に今回の試験の適用限界に付いてまとめておかねばならない。すなわち

a 実際の岩盤は拘束状態にあるが、今回の試験での養生条件は非拘束状態である。この条件は岩石の劣化を促進させる傾向にある。

b 地下深部の地下水は還元状態にある等、化学的な活性度が用いた水道水とは異なる。さらに水道水の化学的な成分は多少の変動がある。

c 熱水槽内で熱水には対流等の流れが存在するが、それは局所的なものであり、岩盤中の大きな水の移動とは異なる。

等の条件の違いがあり、特に非拘束状態は劣化を促進させる傾向がある。結論として以下の点が指摘される。

① 1,000日程度の熱水浸漬下でも、X線回折分析などからわかるように二次的鉱物や粘土鉱物に変質する様な変化が見られる。物性の変化は主に力学的な要因により進行するが、化学的な変化も同時に進行しており、特に長期的には供試体内で平均的に起こったと判断される溶脱も物性変化に寄与すると考えられる。

② 石英は風化に対して非常に安定な鉱物であるが、熱膨張率は長石に比べて2倍以上ある。(石英： $34 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, 長石： $12 \sim 18 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$)⁴⁾ この膨張率の差がクラック発生の大きな要因となっており、水の存在はクラック内への吸水によりクラック進展を助長する働きをする。これは短期的な実験⁵⁾によっても確認されている。

③ 弾性波速度の変化には急激な変曲点が存在しないが、透水性は600日程度の養生により急激な透水性の増加が現れ、1,030日養生で3~4オーダー増加し、 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ cm/sec}$ の透水係数となる。これは弾性波が未風化の速度の速い部分を選択して伝播していくために見かけ上速い速度が得られ、逆に透水においてはクラックの発達した部分を集中的に透過するためと考えられる。

岩盤構造物の品質および周辺環境を長期にわたり保証する場合に、種々の解析において周辺岩盤の物性が時間と共に変化することを考慮する必要性については検討の余地がある。この研究では限定された条件下での実験結果ではあるが、マイクロクラックの進展および鉱物の変質に伴う顕著な透水係数の増加、および弾性波速度の時間に伴う漸減傾向が指摘された。今後、これらの結果を評価につなげていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 江原昭次, 大木敏哉, 柳谷 俊, 寺田まこと: 岩石の熱サイクルにともなうAEについて, アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, p. 177~182, (1981)
- 2) 平間邦興, 丸山 誠, 桑原 徹, 鈴木健一郎: 花崗岩の熱履歴に伴う微視的構造と工学的性状の変化に関する実験的研究, 大林組技術研究所報, No. 34, p. 1~5, (1987)
- 3) 須藤俊夫, 他: 粘土鉱物の電子顕微鏡写真図譜, 講談社サイエンティクス, (1980)
- 4) The Geological Society of America: Handbook of Physical Constants, The Geological Society of America, Inc., (1966)
- 5) 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, Vol. 370, III-5, (1986)