

軟岩の力学特性に及ぼす塩化ナトリウムおよび塩化カルシウム 水溶液濃度の影響

THE INFLUENCE OF NaCl AND CaCl₂ CONCENTRATION IN SOLUTION BEING CONTAINED IN SOFT ROCKS ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS

石原裕治*

By Yuji ISHIHARA

In this study, the variation of mechanical characteristics for soft rocks in the salt concentration of solution contained in soft rocks changing have been examined and investigated. In this paper, the variation of longitudinal wave velocity for soft rocks is investigated by the surface phenomena of clay minerals in soft rocks.

From the results, it became clear that the longitudinal wave velocity for soft rocks decreased in the salt concentration becoming lower, but the longitudinal wave velocity for heated samples of soft rocks showed almost the same value.

Keywords: rock mechanics, soft rocks, mechanical characteristics

1. まえがき

本研究は軟質な岩石の力学特性に及ぼす水質の影響を扱ってきた^{1)~3)}。岩石中に存在する粘土鉱物は含ませる水溶液の水質が変化すると膨潤性等の特性が変化することが知られている^{4),5)}。従来は岩石の吸水膨張量の変化によって岩石の力学特性の変化を解釈した^{1)~3)}。岩石中にはコロイド粒子(主として粘土鉱物)が存在する。コロイド粒子に含ませる水溶液の水質が変化するとコロイド粒子はその特性を変化させることが知られている⁶⁾。他の分野の特性(コロイド化学)であっても、自らの分野(岩石力学)に他の分野の物質が存在する場合、その物質の物性を無視していると、自らの分野において重要な因子(水質)を見落としてしまうので、本論文では岩石中に存在するコロイド粒子—岩石中に存在するコロイド粒子は^{6)~8)}、粘土鉱物だけではないが、岩石力学に影響を与えるものとして、粘土鉱物に着目する—の水溶液中での挙動を調査し、岩石の力学特性の変化の検討に利用することを目的とする。

本論文では軟岩として軟質な凝灰岩を用い、力学特性として岩石内部の微小な力の変化によって変化すること

が知られている⁹⁾縦波速度の変化を扱い、水溶液の水質が変化するときの岩石中の微細粒子の膨潤性の変化を調査し、岩石中の微細粒子の沈降分析⁷⁾とゼータ電位を測定する。そして沈降分析とゼータ電位の結果を粘土鉱物の膨潤性と関連付けて軟岩の力学特性の変化の検討を試みる。

沈降分析の結果によると^{7),10)}、今回用いた凝灰岩中の粘土鉱物、モンモリロナイトの粒子間に作用する力は、水質が変化するとき、変化量が小さく、砂岩中に存在する粘土鉱物、カオリナイトの粒子間に作用する力は著しく大きく変化することが知られている。この場合、水溶液は高分子コロイド水溶液である。また、水に浸された粘土鉱物に電気透析を行えば、粒子間の反発力は最小になり粘土鉱物の結合力が最高になることが知られている⁷⁾。1987年までの研究は、水質を変化させたとき力学特性が偶然変化したことと岩石の力学特性との関連から膨潤性の存在する粘土鉱物を含む岩石を取り扱っていたので、力学特性の変化量が小さかった。今後は他の粘土鉱物を含む岩石、他の水溶液を扱い、水に浸された多孔質な軟岩に電気透析を行う等して水溶液に浸された軟岩の強度を著しく変化させる研究を行うことが必要と思われる。以上述べたことが可能になれば、水に浸された部分の軟質な岩盤の強度を変化させ、水に浸された部分(川

* 正会員 工博 元・早稲田大学嘱託研究員
(〒735 広島県安芸郡府中町石井城 2-9-13)

や海底)の土木物や構造物の施工の際に役立てることが可能になると思われる。

本研究において、岩石は軟岩であっても多種類あり、水質も種々あり、また種々他の特性を実験で調べ力学特性と関連のないものはすべて消去しながら岩石中の粘土鉱物の膨潤性との関連によって検討してきたが、検討事項は他にあるかもしれない。

2. 試料および測定方法

(1) 試料

軟岩のサンプルとして用いたものは栃木県大谷産の凝灰岩(大谷凝灰岩と呼称)と福島県白河産の凝灰岩(白河凝灰岩と呼称)で双方とも新第三紀生成のものである。白河凝灰岩は磁鉄鉱を伴い、また両凝灰岩とも石英・長石の結晶粒子を伴う。粘土鉱物として白河凝灰岩はモンモリロナイトを、大谷凝灰岩はモンモリロナイトとイライトを含む¹⁾。また大谷凝灰岩はゼオライトを含む。粘土鉱物は骨格(結晶粒子)の周辺に存在し骨格を膠結し、ある構造をもって存在する(例:カードハウス構造)。本論文ではこの部分の粘土鉱物を微細粒子とよぶ。粘土鉱物のうちモンモリロナイトの岩石中における含有量をX線によって調べた⁴⁾。岩石中におけるモンモリロナイトの含有量は大谷凝灰岩で約7%、白河凝灰岩で約11%を示した。なお、大谷凝灰岩の孔隙率は約38%、乾燥密度は約1.4 g/cm³、白河凝灰岩はそれぞれ21%、2.1 g/cm³である¹⁾。軟岩中の粘土鉱物の膨潤性を消失させるために大谷凝灰岩と白河凝灰岩の加熱試料を作製した。モンモリロナイトは800°Cから900°Cの温度でその構造を崩壊させることが知られている⁴⁾ので、両凝灰岩(円柱状試料)を電気炉に入れ電気炉を900°Cまで昇温したのち(昇温速度2.14°C/min)その温度で2時間保持し、その後約6時間かけて自然放冷した。未加熱試料のX線粉末回折パターンをFig. 1に示す。

図でわかるように大谷凝灰岩と白河凝灰岩中の粘土鉱物は加熱することにより明らかに消失している。

次に軟岩中の微細粒子の界面現象膨潤性を調べるために軟岩の破碎試料を作製した。大谷凝灰岩と白河凝灰岩を初めに粗砕し、それらを乳バチで軽く粉砕し、270 mesh under(粒径53 μm以下)の粉末試料とした。粉末試料をJIS M 8801に従い気乾試料とし実験(沈降分析、ゼータ電位の測定、膨潤量の測定)に用いた。そして、モンモリロナイトの膨潤量を測定するために、モンモリロナイトを100%近く含む福島県安中市産のベントナイトを用いた。

(2) 測定方法

今回用いる岩石中に存在する粘土鉱物は粘土鉱物、モンモリロナイトを含み、モンモリロナイトは含ませる水

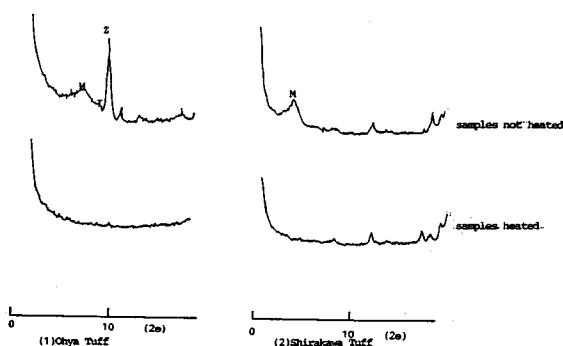


Fig. 1 Xray analysis of samples heated and not heated of Ohya Tuff and Shirakawa Tuff.

(I : Illite, Z : Zeolite, M : Montmorillonite)

溶液の水質が変化すると膨潤度を変化させることが知られている。したがって水質が変化するときの岩石中の微細粒子の膨潤度の変化を調査する。そして岩石の力学特性の変化を検討するためにその結果を利用する。また、粘土鉱物はコロイド粒子であるので水質が変化するときのコロイド粒子の挙動を調査し、膨潤性との関連をとらえるために、岩石中の微細粒子の沈降分析とゼータ電位の測定を行う。力学特性として水質が変化するときの岩石の縦波速度を測定し、また、岩石中の粘土鉱物が破壊し岩石の吸水膨張がなくなった加熱試料の縦波速度を測定する。

a) 沈降分析

膨潤する粘土鉱物を含む懸濁液の沈降分析において分散するものは膨潤度が高く、凝集するものは膨潤度が低くなる^{4),7)}。沈降分析は2日で結果が出、膨潤度の測定は1週間以上かかり、また周囲の振動などの影響を受けるときは採用できず、試料数の多いこと等から結果を出すのに長い時間を必要とする。また、粘土鉱物の粒子間に作用する力の強弱を調査するのに、膨潤性の存在しない粘土鉱物であっても沈降分析によって判断が可能である^{7),10)}。したがって、沈降分析は粘土鉱物の粒子間に作用する力の強弱を容易に手早く検討するのに重要である。

本実験では、直径25 mm、高さ220 mmで0.1 mmごとの目盛り付きガラス管(沈降管)が用いられた。粉末試料4 gを沈降管に入れ、濃度の異なる塩化ナトリウムと塩化カルシウム水溶液をそれぞれ沈降管の50 mlの標線まで注入し、沈降管を十分振とうし、静置した。実験は約291°Kの実験室内において行われた。

b) ゼータ電位の測定

ゼータ電位は電気化学等の他の分野のものであるが、文献の調査^{6),8)}等に基づきその測定方法を示す。

顕微鏡泳動法によりゼータ電位が求められた。装置は

ゼータメータ社のゼータメータを使用した。セルはガラスステフロン製の円筒形セルで電極は白金イリジウム合金である。前述の粒径 $53 \mu\text{m}$ 以下の粉末試料を用い、溶液に試料を入れ 10 分間攪拌し、(溶液濃度 $100 \text{ mg}/100 \text{ ml}$) 30 分間静置する。懸濁液の導電率を測定し、電圧を決定する。電圧をかけて泳動速度が安定したらカウントを開始する。20 個の粒子の泳動時間と泳動距離を測定し、泳動速度の平均値を求める。ゼータ電位の値は Smolochwsky の式を用いて計算する⁵⁾。

$$v = \epsilon \zeta E / 4 \pi \eta \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 v : 泳動速度 (cm/s)

E : 電位勾配 (V/cm)

ζ : ゼータ電位 (V)

η : 溶液の粘性係数 (poise)

ϵ : 溶液の比誘電率

本実験は岩石中のコロイド粒子 (主として粘土鉱物) の水溶液中における挙動を調査し、岩石中の粘土鉱物の膨潤性と関連付け岩石の力学特性の変化を検討するためのものである。

c) 膨潤量の測定

本実験は岩石中の粘土鉱物の膨潤性が岩石の力学特性に影響を与えると考え、粘土鉱物に含ませる水溶液の水質が変化するときの膨潤性の変化を調査するために行う。

気乾させた粉末試料を円筒状の容器に入れ^{2),3)}、所定の密度 ($1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$) まで締め固めた。このような容器にそれぞれの水溶液を含ませ、ダイヤルゲージをセットし、縦方向の膨潤量を測定した。膨潤が終了するまでに塩濃度が低いものほど長い時間を必要とし、濃度の高いもので約 100 時間、低いもので約 170 時間を要した。

d) 縦波速度の測定

試料は直径 30 mm、長さ 60 mm の円柱状に整形した。整形後、乾燥器 (70°C) で重量変化が認められなくなるまで乾燥した。塩濃度が縦波速度に及ぼす影響を調べるために乾燥試料の縦波速度が測定され、速度のばらつきが 5 % 以内になるような試料 (100 本に対し約 20 本可能) が選定された。減圧吸水法により、それらの試料に濃度の異なる塩化ナトリウム水溶液と塩化カルシウム水溶液を含ませ試料の含水飽和度を 100 % とした。水溶液の入ったビーカー中に岩石を 1 週間以上静置した後¹⁾、縦波速度を測定した。また未加熱の岩石試料を加熱し、上記と同じ方法で加熱試料の縦波速度を測定した。

3. 測定結果

沈降分析の結果の観察図を Fig. 2 に示す。図に示すように大谷凝灰岩と白河凝灰岩の粉末試料の懸濁液は塩化ナトリウム水溶液では $10^{-1} \text{ mol}/\text{l}$ 、塩化カルシウム水溶

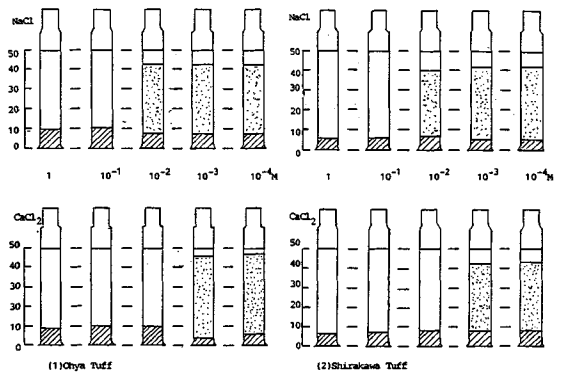


Fig. 2 The sedimentation analysis.

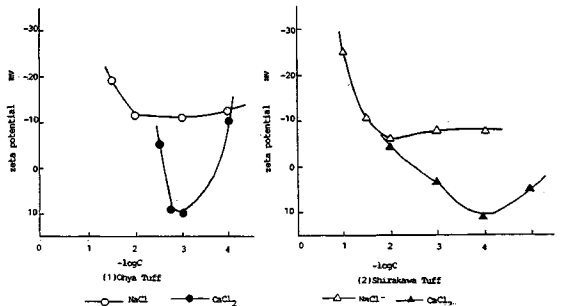


Fig. 3 Relation between zeta potential and salt concentration.

液では $10^{-2} \text{ mol}/\text{l}$ 以上の濃度で凝集し、それより低い濃度で分散している。

軟岩の粉末試料の示すゼータ電位と塩濃度の関係を Fig. 3 に示す。塩化ナトリウム水溶液の場合、両凝灰岩ともゼータ電位は $10^{-4} \text{ mol}/\text{l}$ から $10^{-2} \text{ mol}/\text{l}$ まで少しずつ増加しながら進み、 $10^{-2} \text{ mol}/\text{l}$ より濃度が高くなると値は低下し、 $10^{-2} \text{ mol}/\text{l}$ で反転している。塩化カルシウム水溶液の場合は、大谷凝灰岩で $10^{-3} \text{ mol}/\text{l}$ までゼータ電位は増加しながら進み、その濃度で反転を起し元に戻っている。

次に軟岩の粉末試料およびベントナイトの膨潤度と塩濃度の関係を Fig. 4 に示す。図において塩濃度が高いと膨潤度は低く、塩濃度が低いと膨潤度は高くなっている。モンモリロナイトを 100 % 近く含むベントナイトの膨潤度は 30 % から 180 % の間で変化し、軟岩の粉末試料は 10 % から 20 % の間で変化している。

軟岩の縦波速度と塩濃度の関係を Fig. 5 に示す。図において縦波速度と塩濃度の間の全体的な関係を調べるために、直線を最小二乗法により求めた。本実験において両者の間の関係は次のようになった。

・塩化ナトリウム水溶液の場合

- 1) 大谷凝灰岩

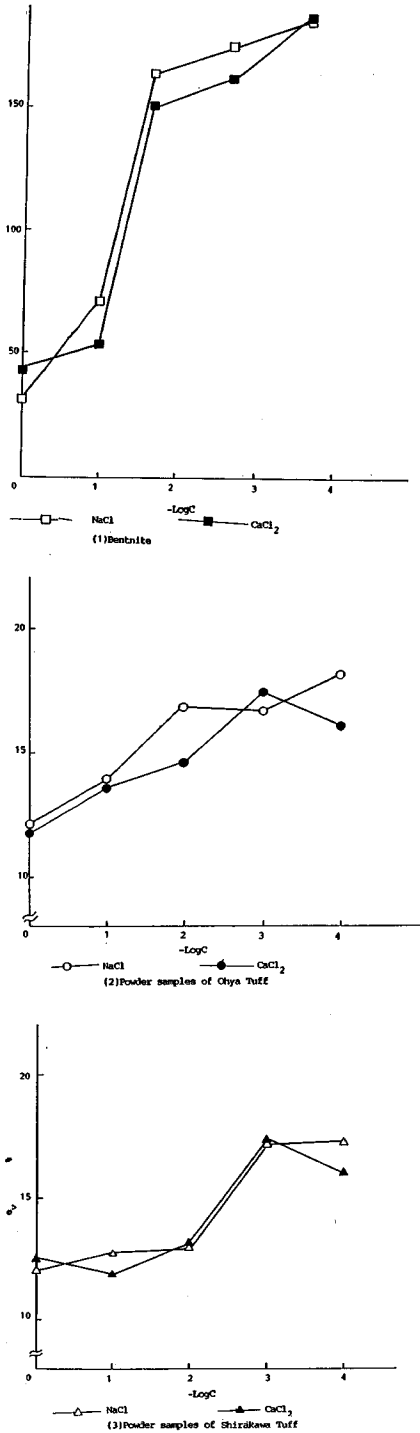


Fig. 4 Relation between the amount of swelling and salt concentration in solution.

$$V_p = -0.066 \cdot (-\log C) + 2.63 \dots \dots \dots (2)$$

 2) 白河凝灰岩

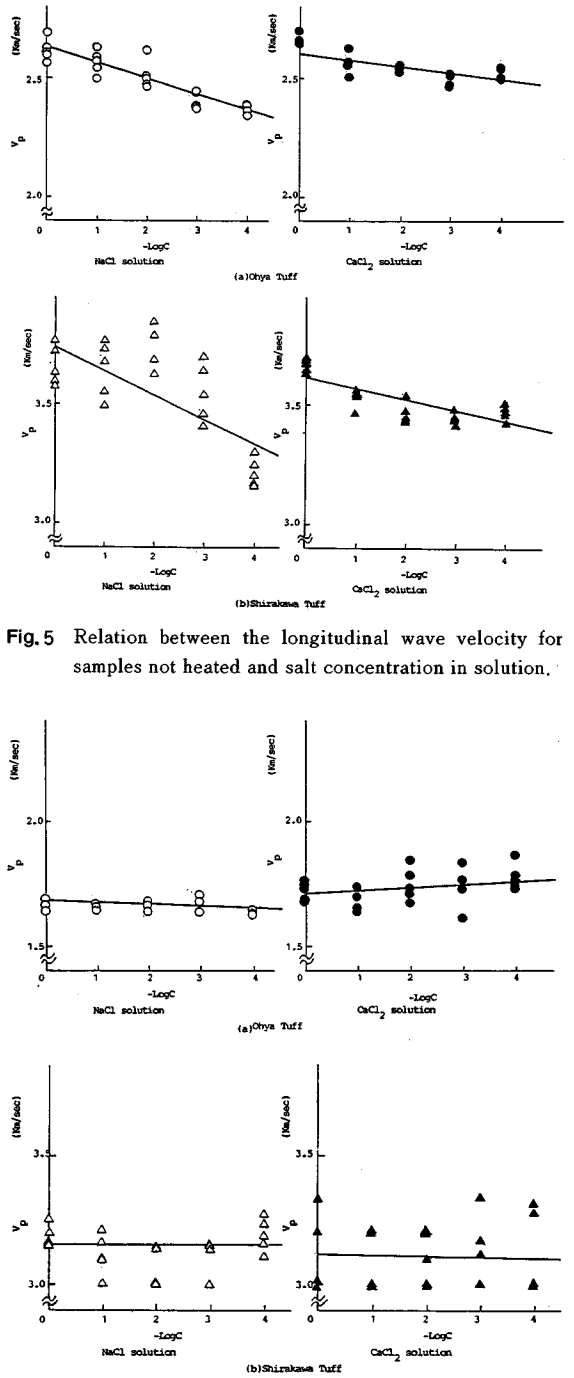


Fig. 5 Relation between the longitudinal wave velocity for samples not heated and salt concentration in solution.

Fig. 6 Relation between the longitudinal wave velocity for samples heated and salt concentration in solution.

$$V_p = -0.078 \cdot (-\log C) + 3.74 \dots \dots \dots (3)$$

・塩化カルシウム水溶液の場合

1) 大谷凝灰岩

$$V_p = -0.033 \cdot (-\log C) + 2.62 \dots \dots \dots (4)$$

2) 白河凝灰岩

$$V_p = -0.039 \cdot (-\log C) + 3.61 \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 V_p ：縦波速度 (km/s)

C ：水溶液の濃度 (mol/l)

$$10^{-4} \leq C \leq 1$$

式(2)から式(5)に示すように、塩濃度が低くなるに従い縦波速度は低下する傾向を示している。また、縦波速度の低下する割合はイオン価の高い塩化カルシウム水溶液を含ませた試料の方が低くなっている。10年近い研究においてここで示したような結果が常に得られている。岩石中の粘土鉱物を破壊させた加熱試料と塩濃度の関係を Fig. 6 に示す。図中の直線は最小二乗法により求めたものである。図から明らかなように塩濃度が変化するとき縦波速度はほとんど同様な値を示している。すなわち、縦波速度と塩濃度の間には明瞭な関係が認められない。

4. 考 察

本研究は、軟岩中に存在する粘土鉱物の膨潤性によって、岩石の力学特性の変化を検討してきた^{1)~3)}。本論文では軟岩中に存在する微細粒子の水溶液中での挙動を調査(沈降分析およびゼータ電位の測定)し、膨潤性と関連付け軟岩の力学特性の変化を検討する。

今回用いたような骨格の存在する軟質な岩石の構造モデルを Fig. 7 に示す¹¹⁾。

この構造モデルは軟岩中の微細粒子(主として粘土鉱物)の存在に着目し、粗粒子(S_1, S_2)はセメント物質(S_3)により結合され骨格を形成し、微細粒子(S_4)が骨格を膠結している状態を表わすものである。粘土鉱物の粒子間に作用する力が変化すると粘土鉱物の膨潤度が変化し、この膨潤度の変化によって軟岩の力学特性の変化を検討しているので Fig. 6 で粘土鉱物を破壊させ、膨潤性を消失させた加熱試料の縦波速度に塩濃度の影響がなかったことからやはり構造モデルの微細粒子(主として粘土鉱物)の挙動を調査・検討することが重要と思われる。

粘土鉱物は水溶液中で主として負に帯電する。そして

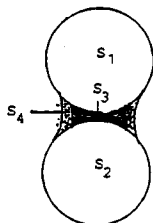


Fig. 7 Structural model of soft rocks. (S_1, S_2 : Grain, S_3 : Cementing material, S_4 : Particles)

この電荷とつり合うように間隙水中の正の電荷が粘土粒子表面に吸引され電気二重層を形成する。水溶液中で隣り合う粒子間には引力と反発力が働く。粒子間に作用する引力は帯電したイオン原子間のクーロン力、またはイオン間力と比電荷分子間のファンデルワールス力がある。また、粒子の表面電荷のまわりに広がる電気二重層の重なり合いに基づく電氣的な相互作用として粒子間に反発力が生じる⁶⁾。隣り合う粘土粒子間で電気二重層がどのように相互に作用するかを考えることは、粘土の膨潤性、塑性、保水性を説明するのに欠かせないものである^{4), 5)}。そこで粘土鉱物の粒子間で電気二重層がどのように相互に作用するか検討することにより各実験の変化機構を考える。

粘土鉱物の粒子間距離は以上の引力と反発力の合成ポテンシャルに依存する。25°Cの水溶液中で粘土粒子表面の電気二重層の厚さは次式で与えられる^{5), 6)}。

$$(1/K) = 3 \times 10^{-8} / \mu \sqrt{C} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、

(1/K)：電気二重層の厚さ (cm)

C ：電解質の濃度

μ ：イオン価

試料に含ませる水溶液の濃度が $C_1, C_2 (C_1 < C_2)$ と変化するとき、粒子表面の電気二重層の変化量は式(6)より次式で表わされる。

$$\Delta(1/K) = 3 \times 10^{-8} (1/\sqrt{C_1} - 1/\sqrt{C_2}) / \mu \dots \dots \dots (7)$$

ここで、

$\Delta(1/K)$ ：電気二重層の厚さの変化量

水溶液の濃度が低いと式(6)から電気二重層の厚さは厚くなり懸濁液は分散し、試料は膨潤度を高め、塩濃度が高いと電気二重層の厚さは薄くなり懸濁液は凝集し、膨潤度を低くする^{4), 5), 8)}。Fig. 2 で示したように大谷凝灰岩、白河凝灰岩の粉末試料で作った懸濁液は塩濃度が低いと分散し、高いと凝集している。そして軟岩の構造モデル中の S_4 の部分もこの状態と同じようになっていると考えられる。

粘土鉱物のうちモンモリロナイトは以上示した粘土鉱物の粒子間距離の変化に基づいて膨潤度を大きく変化させることが知られている。ベントナイトに含まれる水溶液の塩濃度が低いと膨潤度は高く、塩濃度が高いと膨潤度は低くなっている。ベントナイトはモンモリロナイトを 100% 近く含み³⁾、膨潤度とその変化量は大きい。大谷凝灰岩と白河凝灰岩の粉末試料の膨潤度も塩濃度が高いと低く、塩濃度が低いと高くなる。膨潤度がベントナイトの場合の約 1/10 を示しているのは、大谷凝灰岩・白河凝灰岩のモンモリロナイトの含有量が約 10% であることによると思われる。

沈降分析において懸濁液が分散する塩濃度の水溶液を

含ませた試料の膨潤度は高く、凝集する塩濃度の水溶液を含ませた試料の膨潤度は低くなっている。

軟岩中の微細粒子 (S_1) は塩濃度の変化に伴い膨潤量を変化させ、粗粒子を押し出し骨格を膨張させ、軟岩試料の吸水膨張量を変化させる。塩濃度が変化するとき、大谷凝灰岩と白河凝灰岩の吸水膨張による縦方向ひずみは0.25%から0.35%の間で変化する²⁾。それぞれの凝灰岩量が著しく小さいのは、岩石中の粗粒子がセメント物質により固結されていることによるものと考えられる。

次に Fig. 3 に示したゼータ電位の変化から水溶液中の微細粒子の界面現象を検討する。図においてゼータ電位は塩化ナトリウム水溶液で 10^{-2} mol/l, 塩化カルシウム水溶液の場合、大谷凝灰岩の試料で 10^{-4} mol/l, 白河凝灰岩の試料で 10^{-3} mol/l で変化し反転を起こしている。粘土粒子表面の有する電荷量は常に一定であり、1価イオンに比べて2価イオンの方が粒子表面に吸引されるイオン数は少ない。したがって、ナトリウムイオン (Na^+) とカルシウムイオン (Ca^{2+}) のようにイオン半径がほぼ等しい場合(それぞれ 1.16×10^{-3} cm, 1.14×10^{-3} cm), 同一濃度で二重層内に含まれる陽イオン数は2価イオンの方が少なく、そのため2価イオンの二重層の厚さが小さくなり、低濃度で二重層の0電位面がすべり面に近づく。それで塩化カルシウムを含む懸濁液の方がより低濃度でゼータ電位は変化を起こしていると考えられる。

Fig. 2 において両凝灰岩の粉末試料とも塩化カルシウムを含む懸濁液の方が塩化ナトリウムを含む懸濁液より低濃度で凝集を起こすのも、塩化カルシウムを含む懸濁液中の粒子の方が粒子表面の二重層の厚さが小さいことに基づいていると考えられる。Fig. 7 で示した軟岩の構造モデルにおける微細粒子はある構造をもって存在する(例：カードハウス構造)が構造をもつ場合も粒子としての水溶液中での挙動と同様であることが知られている⁴⁾。

次に以上のような軟岩中の微細粒子の界面現象と膨潤性が軟岩の力学特性に及ぼす影響を考える。

軟岩試料が水溶液を含まれると軟岩中の微細粒子、Fig. 7 の S_1 は粒子間に反発力を作用させる。含ませる水溶液の塩濃度 (10^{-4} mol/l $\leq C \leq 1$ mol/l) が低いほど粒子間に作用する反発力は大きくなり、微細粒子は反発し膨潤度を高める (Fig. 4)。岩石中のセメント物質が結合し、骨格を形成し岩石は固結しているが、このとき岩石全体がもつ結合力を固結度と定義する。微細粒子同士が反発し、粗粒子に衝突し、粗粒子を押し広げセメント物質による固結度を低める。岩石に水溶液が浸透したとき、微細粒子間に作用する反発力が0のとき岩石のもつ固結度を P_0 (kg/cm²) とする。この軟岩試料に水溶液

を含まれると粘土鉱物を主とする微細粒子間の反発力、引力に基づく力が粗粒子に作用し、固結度 P_0 (kg/cm²) を減少させる。このようにして生じた新たな固結度を P (kg/cm²) として以下の関係式を得る。

$$P = P_0 - \Sigma(R - A) \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

$\Sigma(R - A)$: 微細粒子の粒子間に作用する力の総和

R : 粒子間の反発力を断面積で割った値

A : 粒子間の引力を断面積で割った値

塩濃度が変化するときの固結度の変化量を ΔP とする。粒子に作用する力は、前述の微細粒子の挙動から変化する。

$$\Delta P = \Delta \Sigma(R - A) \dots \dots \dots (9)$$

ここで、

ΔP : 軟岩の固結度の変化量

$\Delta \Sigma(R - A)$: 軟岩中の微細粒子間に作用する力の変化量

この固結度の変化により軟岩の力学特性の変化を検討する。

軟岩中の微細粒子の表面の電気二重層の厚さは、軟岩に含ませる水溶液の塩濃度が低いほど厚くなるのが式(6)より考えられる。そして電気二重層の厚さが厚いほど粒子間に作用する反発力は大きくなり粒子間に作用する力の総和も大きくなる。そのため、塩濃度が低いとベントナイトおよび軟岩中の微細粒子の膨潤度は高くなると思われる。そして軟岩の固結度が塩濃度が低いと低くなると考えられる(式(8))。塩濃度が C_1 のときの軟岩の固結度を P_1 , C_2 のときの固結度を P_2 とすると、次の関係式が成り立つ (10^{-4} mol/l $\leq C_1 \leq C_2 \leq 1$ mol/l)。

$$P_1 < P_2 \dots \dots \dots (10)$$

式(10)のように軟岩に含ませる水溶液の塩濃度が低いほど軟岩の固結度は低くなるので、Fig. 5 のように軟岩の示す縦波速度は塩濃度が低いと低下する傾向を示すと考えられる。

また、軟岩に含ませる水溶液のイオン価が低くなると、軟岩中に存在する微細粒子表面の電気二重層の厚さの変化量は大きくなる(式(7))。水溶液の塩濃度が C_1 のときの電気二重層の厚さを $(1/k_1)$, C_2 のときの厚さを $(1/k_2)$ とすると、二重層の厚さの変化量は式(7)で与えられる。この式によって電気二重層の厚さの変化量はイオン価が低いほど大きくなる。それで、塩濃度が変化するときの軟岩の固結度の変化量も、水溶液のイオン価が低いほど大きくなる。水溶液のイオン価が μ_1 のときの軟岩の固結度の変化量を ΔP_1 , イオン価が μ_2 のときの変化量を ΔP_2 とすると ($\mu_1 > \mu_2$) 次の関係式が得られる。

$$\Delta P_1 > \Delta P_2 \dots \dots \dots (11)$$

軟岩の力学特性に及ぼす水質の影響を軟岩中に存在す

る微細粒子の粒子間に作用する力の影響と考えるならば、軟岩にイオン価の高い水溶液を含ませると微細粒子の粒子間に作用する力の変化量が小さいことから、軟岩の縦波速度の変化する割合は低くなると考えられる。

以上のように軟岩の力学特性に及ぼす水質の影響を、軟岩中に存在する微細粒子の挙動の変化によって検討すると実験結果の変化がよく表わされる。しかし本研究においては力学特性の変化する量が小さいので^{1),2)}、異なる水質の溶液、粘土鉱物の含有量の大きい軟岩を用いて力学特性の変化する量の大きいものを調査していくことが必要と思われる。

5. 結 論

本論文において、軟岩中の微細粒子の水溶液中での挙動が沈降分析とゼータ電位の値の変化によって検討された。そして、これらの微細粒子の水溶液中での挙動は軟岩中の微細粒子—主として粘土鉱物、モンモリロナイト—の膨潤度の変化と関連付けられた。また、軟岩中の微細粒子の膨潤性によって今回用いた軟岩の力学特性の変化が検討されているので、微細粒子の水溶液中での挙動（コロイド化学の特性）も岩石の力学特性と関連付くことが明らかとなった。

コロイド粒子の特性はミクロな分野の特性で、岩石の力学特性はマクロな分野の特性であるので、ミクロな分野の特性でマクロな分野の特性を検討しても偶然の一致のように思える。しかし、粘土鉱物の膨潤性はコロイド粒子（粘土鉱物）表面の電気二重層の厚さの変化によ

て解明され、粘土粒子が集合した試料で膨潤度の大きな変化（ベントナイトの膨潤度の変化、Fig. 4, (1))が現われ、また、ミクロな分野の特性により、広大な自然の地盤の膨潤性も説明される。したがって、マクロな分野の力学特性も、岩石の中にミクロな粘土粒子を多量に含んでいるので、ミクロなコロイド粒子の特性をよりよく調査・検討して関連付けることが重要と思われる。

参 考 文 献

- 1) 石原裕治・荻原義一：軟岩の力学特性に及ぼす塩化ナトリウム水溶液濃度の影響およびその機構に関する研究，日本鉱業会誌，Vol. 99, No. 11, 1983.
- 2) 石原裕治・荻原義一：軟岩の力学特性に及ぼす塩濃度の影響およびその機構に関する研究，日本鉱業会誌，Vol. 100, No. 8, 1984.
- 3) 石原裕治・荻原義一：軟岩（凝灰岩）の応力—ひずみ関係に及ぼす塩濃度の影響，日本鉱業会誌，Vol. 102, No. 6, 1986.
- 4) 最上武雄：土質力学，土木学会監修，S. 44. 8.
- 5) 土の物理学：土壌物理研究会編，森地出版，1979.
- 6) 北原文雄・渡辺 冒：界面電気現象，共立出版，1972.
- 7) 広部良輔：東京大学工学部（学位論文），1974.
- 8) 高橋正雄・仁木克己・朝倉裕治，共訳：電気科学システム，コロナ社，S. 51.
- 9) 宮村攝三：地震・火山・岩石物性，共立出版.
- 10) 麻生欣次郎・森 祐行・原 剛：鉱物粒子の凝集分散とゼータ電位，九大工学集報，Vol. 45, No. 2.
- 11) 北岡宗洋：早稲田大学理工学部（学位論文），1979.
(1987. 12. 3・受付)