

蛇紋岩と土木工事 (第2報)

——蛇紋岩地帯の陸水の水質——

野 地 正 保*

1. はじめに

この報告では、蛇紋岩地帯の陸水の水質について、トンネルと地すべり地を例に、その特徴や地質探査への応用、土木工事とのかかわりなどについて述べる。

第1報では、蛇紋岩と蛇紋岩化作用について述べ、蛇紋岩が他の岩石に比し、成因、組成などの点で特異な存在であることなどを述べたが、蛇紋岩にかかわる陸水もその特異な化学組成を反映し、他の岩石地帯の陸水とまったく異なった性質を有している。このために、蛇紋岩の水質分析が、土木工事とのかかわりのなかでとくに地質探査にあたって有効な手段となり得るのである。

しかし、土木技術者にとって水質などという分野はなかなか理解されにくい面を有しているように思われるので、ここの報文では、これまで行われた土木工事における地下水分析の例を紹介し、地下水の水質について土木技術者の理解と関心を深めていただき、あわせて蛇紋岩地帯の陸水の水質の特徴を理解していただくように努めた。

この報文の作成にあたって陸水の採集は、札幌開発建設部深川農業事務所の方々のご協力をいただいた。また、水質分析は主として野外科学 K.K. で実施し、一部については現帯広開発建設部土地改良課、石渡主任が当所土壤保全研究室の主任研究員として在任中に実施していただいた。また、分析値の相関図の作成にあたっては、当所特殊土壤開発研究室、岸副室長の協力をいただいた。

これらの方々に、感謝の意を表すものである。

2. 土木工事と地下水の水質

水と土木工事は切っても切り離せない問題であり、多くの場合水の処理が解決すれば、土木工事の大勢が解決したといっても過言でない。しかし、このような水も、水質ということになると、特殊な場合を除き土木技術者の興味や関心をひくものとはなっていない。しかも、最近の土木工事では、水質汚濁防止法や環境問題もからみ、工事によって発生する濁水処理に関しての水質の問題が重要な課題としてクローズアップされてきたり、重金属元素の存在の有無、BOD、COD 値などの生活環境

項目が問題となることはあるが、一般の河川水や地下水に普遍的に見いだされるマグネシウムやカルシウムイオンなどについては、注目される機会が少ない。

しかし、土木工事を自然界のなかでの一事象という目でとらえるなら、水質、とくに地下水の水質が土木工事にも大きなかかわりを有することが理解される。すなわち、土木工事において、基礎地盤の性状は工事の性格を左右する大きな要素であるが、その性状がその成因や広い意味での風化過程 (岩盤として見た場合の劣化過程) に規制されることはいうを待たない。また、この風化過程では、物理的風化であれ化学的風化であれ、水が関与することはよく知られており、とくに化学的風化における水の役割は大きく、このことは後に述べるように、地球表層の天然水の 97% を占めるといわれる海水の溶存元素が、すでに海水から固定された膨大な量の岩塩、石灰岩やチャートなどの量を合わせ、主に河川水によってもたらされたものであることをみれば、逆に風化過程における水の役割の大きさ、したがって、水質の重要性が想定される。

このようにみえてくると、土木工事において、自然水としての水質の問題に、より注意が向けられてよいであろう。

ここでは、地下水の水質の基本的性格を概観し、具体的な内容として、これまでに行われた土木工事と地下水についての報文を概括して報告したい。

2-1 地下水の水質

ひと口に地下水の水質といっても、その見方や利用目的によって異なった観点が生じるであろうが、ここでは、岩石、地層の風化過程ということに焦点をあてて概観してみよう。

火山蒸気や温泉水の一部などごく特殊な例を除き、陸水は降水によってもたらされる。陸水は一般に河川水、湖沼水、地下水に大別されるが、湖沼水は河川水が地表で停滞している特殊例とみる事ができるので、河川水と地下水についての考察で、一般的には十分である。

一方、降水は蒸発散分を除くと、その流出機構から表流水、中間流出、地下浸透に分けられる。これらが、そ

*地質研究室副室長

れぞれのおかれた環境に応じ、流出する間に周囲の土や岩石などから授受する元素やイオンによって、その水質(化学成分)を特徴づけるのである。

そして、このようにして、水に溶解される元素イオンの量がいかに膨大なものとなるか、いい換えれば、水に

よる溶解作用が、大量の岩石、地層の風化による劣化をもたらしているかは、想像をはるかに越えるものがある。

次に、上記の過程を具体的なデータでみてみよう。

表-1¹⁾は、降水、沢水、海水の主要化学成分である。

表-1 海水、降水の主要化学成分

成 分	(1) 海 水 (g/kg)	(2) 降 水 (mg/ℓ)				(3) 沢 水⑤ (mg/ℓ)
		(a)八丈島①	(b)名古屋②	(c)日 本③	(d)大 阪④	
ナトリウムイオン (Na ⁺)	10.56	3.58	0.44	1.1	1.44	4.46
カリウムイオン (K ⁺)	0.38	0.14	n. d	0.26	0.48	0.76
マグネシウムイオン (Mg ²⁺)	1.27	0.45	0.08	0.36	0.46	0.48
カルシウムイオン (Ca ²⁺)	0.40	0.21	0.13	0.97	4.17	1.54
塩 素 イ オ ン (Cl ⁻)	18.98	6.39	0.76	1.1	4.52	4.0
硫 酸 イ オ ン (SO ₄ ²⁻)	2.65	1.19	0.34	4.5	10.92	5.9
重 炭 酸 イ オ ン (HCO ₃ ⁻)	0.14					4.4

① 1964 年、試料数 71、角皆による

② 1946~1947 年、菅原による

③ 1961 年、日本各地、主として市街地の 38 カ所で採取、

④ 1973~1974 年、6 地点各月 1 回採取。長沢、寺口による

⑤ 兵庫県六甲山地、地獄谷東の沢

降水は天然の蒸留作用によって生じたものであるから純水に近いものと考えられやすいが、水蒸気の凝結の核になるのが風送塩をはじめとする大気中の微細粒子であるから、地域性によって降水の塩類濃度には 1 mg/ℓ から数 10 mg/ℓ までの変化がみられる。

表-2²⁾は日本の河川水の平均化学組成である。

これは、1950 年を中心とする前後 15 年間にわたって

行われた研究であり、今日のように河川水の汚濁が進行していない状態のものである。この平均値は大、中河川の中、下流部における調査の結果であって、上流部では一般に各成分の濃度は低くなっている。

さて、河川水から降水の組成を差し引いたものが、降水が河川水になるまでの過程で最終的に土や岩石・地層から付加された組成ということになるが、mg/ℓ などと

表-2 日本の河川水の平均化学組成 (mg/ℓ)

地方区分	採 水 河川数	カルシ ウムイ オン CO ₃ ²⁺	マグネ シウム イオン Mg ²⁺	ナトリ ウムイ オン Na ⁺	カリウ ムイ オン K ⁺	重炭酸 イオン HCO ₃ ⁻	硫 酸 イオン SO ₄ ²⁻	塩 素 イオン Cl ⁻	溶存ケ 酸 SiO ₂	鉄 Fe	リン酸 PO ₄ ³⁻	硝酸 チッ 素 NH ₄ ⁺ - N	アンモ ニア態 チッ 素 NH ₄ ⁺ - N	蒸発 残渣	浮遊物
北海道	(22)	8.3	2.3	9.2	1.45	33.9	10.7	9.0	23.6	0.50	0.01	0.54	0.06	87.9	76.9
東 北	(35)	7.7	1.9	7.3	1.06	19.9	17.6	7.9	21.5	0.49	0.01	0.26	0.06	79.1	18.6
関 東	(11)	12.7	2.9	7.3	1.43	42.4	15.9	6.1	23.1	0.23	0.03	0.29	0.08	93.5	22.1
中 部	(42)	8.9	1.7	4.8	1.05	30.1	7.7	3.9	13.7	0.14	0.02	0.18	0.05	62.0	26.9
近 畿	(28)	7.6	1.3	5.5	1.04	27.4	7.4	5.3	12.1	0.11	0.01	0.21	0.04	56.8	20.0
中 国	(25)	6.7	1.1	6.5	0.94	27.2	4.4	6.6	14.1	0.05	0.00	0.20	0.03	56.7	7.4
四 国	(19)	10.6	1.5	3.8	0.66	37.2	5.7	2.4	9.8	0.01	0.00	0.12	0.02	57.0	6.1
九 州	(43)	10.0	2.7	8.6	1.84	40.9	13.1	4.6	32.2	0.13	0.04	0.20	0.04	106.0	29.8
全 国	(225)	8.8	1.9	6.7	1.19	31.0	10.6	5.8	19.0	0.24	0.02	0.26	0.05	74.8	29.2

この表は、小林の研究によって作成されたものである。

いう単位での議論では、あまりにも土木工事ないし日常生活とかけ離れているので、北海道を例にこれらの表から具体的に大胆な概算を試みてみよう。

ごく大づかみな議論なので、北海道の面積を8万km²、年間雨量を1000mm、流出率を0.6とすると、1年間に北海道の河川から海にでる河川水の総量は

$$8 \times 10^{10} \text{ m}^3 \times 1.0 \text{ m} \times 0.6 = 4.8 \times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ となる。}$$

一方、表-2の北海道の河川の平均値からCa⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, SiO₂, HCO₃⁻を流出過程での溶解物質として取りだし、日本の降雨の平均値に含まれるこれらのイオンを引く(単位はmg/ℓ)。

$$8.3 + 2.3 + 9.2 + 1.45 + 33.9 + 23.6 - (0.97 + 0.36 + 1.1 + 0.26) = 76.06 \text{ mg/ℓ}$$

上記の76.06 mg/ℓを北海道から河川水に溶解して海に流出するものと一応仮定する。単位をなおすと、この数値は76 g/m³となる。これに、先に求めた北海道の河川からの年流出量4.8×10¹⁰ m³を乗ずれば、海に流れ去るイオン、元素の総量が算出される。

$$76 \text{ g/m}^3 \times 4.8 \times 10^{10} \text{ m}^3 = 3.65 \times 10^{12} \text{ g} = 3.65 \times 10^6 \text{ t}$$

また、表-2から蒸発残渣について同様の概算をすると、

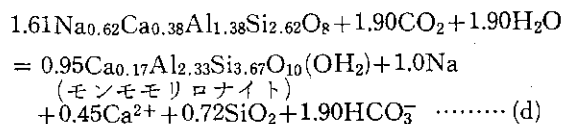
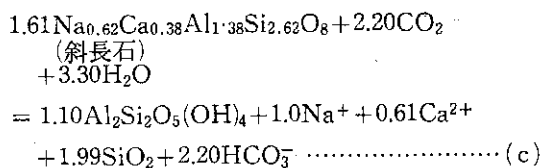
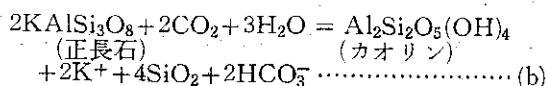
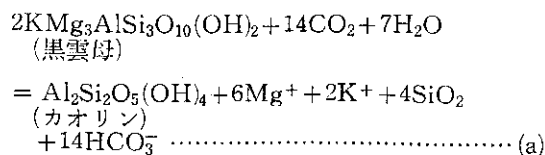
87.9 g/m³ × 4.8 × 10¹⁰ m³ = 4.2 × 10⁶ tとなり、実に1年間で数百万tの物質が河川水によって海へ流出していることになる。

これも大胆な概算であるが、これを土砂など固形物としての流出量と比較してみる。

北海道のダムの年平均堆砂量の実積は300~350 m³/km² yearとなっているが、一般にダムは河川の上~中流に位置するので、河口より流出する量はこれよりは少なくなるはずであり、これを仮に200 m³/km² yearと見積り1 m³を1.8 tとすると、

80000 km² × 200 m³/km² year × 1.8 t/m³ = 2.88 × 10⁷ tとなり、河川水に溶解されて運ばれる物質は、土砂など固形物の数分の1の量になるのである。

一方、母岩から溶かしだされるNa⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺などは一義的に次のような化学式で説明される²⁾。



上の化学式は、花崗石の風化により、粘土鉱物であるカオリン、モンモリロナイトが生成される過程を示したものであり、これによって多くの種類の地質からなる北海道の河川水の水質について、上記の化学式によって直接議論することにはならないが、北海道の表層に分布する地質のかなりの面積を占める熔結凝灰岩や火山灰などは、似た組成を有し、いずれにせよ概算の議論なので、これらの化学式から北海道で毎年風化により生産される粘土鉱物の量を推算すると、以下にみられるように、これもかなりの量となる。

上記a, b, c, dの4つの化学式の右辺のNa⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺の原子量の総和を比べると、カオリン、モンモリロナイトの分子量の総和は、各イオンの総和の3.2倍となる。

北海道から流出する河川水のNa⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺の溶存総量は先に行ったのと同様の計算から

$$\begin{aligned} & 18.6 \text{ g/m}^3 \times 4.8 \times 10^{10} \text{ m}^3 = 8.9 \times 10^{11} \text{ g} \\ & = 8.9 \times 10^5 \text{ t/year} \end{aligned}$$

この量に対応するカオリン、モンモリロナイトの量は

$$8.9 \times 10^5 \text{ t} \times 3.2 = 2.8 \times 10^6 \text{ t}$$

約3百万tの粘土鉱物が道内で1年間に生産されることになる。もちろん、これらは仮定の数字であり、自然の過程は溶脱と置換、沈澱が絡み合ったり粘土化過程もより複雑であり、上記のようなものではないであろう。ここでは、水による風化過程が、自然の営力としていかに大きいかという点での認識に注意を払っていただければよいのである。

このようにみえてくると、土木工事において、自然状態での水質、地下水の水質に注意を払うことの重要性がご理解いただけると思われる。

これまで河川水と降水の水質についてみてきたが、次に地下水と河川水(沢水)の水質について述べる。

これまでみてきたように、水は多くのものを溶かす能力を有する。これは、水分子の特有な構造—大きな双極子能率をもっていることによる—に依存している。この双極子能率が大きいことはそのまま、また水が物を溶か

す大きな能力を持っていることに連なる³⁾。このことについては、すでに北海道の河川の溶解質の量について具体的にみてきたことである。

さて、岩石の風化は(a)岩石の性状などの地質的要素と、(b)水温、水質、水量、水流などの水文要素との二つに依存している。このうち(a)についてみるならば、一般的に岩石は鉱物の集合体とみられるが、火成岩についての鉱物の風化に対する安定度は、図-1, 2に示すように、Bowen の反応系列の逆になること、また、岩盤を構成する岩石粒子の大きさ、いかえれば、節理、われ目、きれつの性質や頻度によって異なることなどが知られている。このことからわかるように、岩石によって化学的な風化速度は、岩石種やその置かれた状態により異なり、したがって、水に溶かしだされる元素の種類や量もこれらによって大きく異なることも当然である。

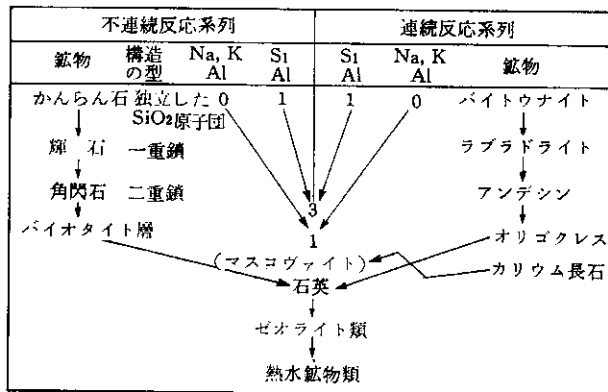


図-1 Bowen による反応系列 (松井義人, 一国雅己訳: B メイソン: 一般地球化学, 岩波書店, p. 155 による)

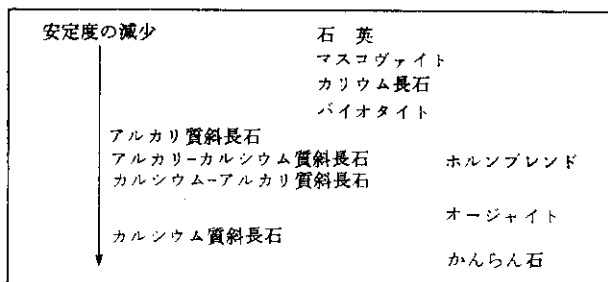


図-2 Goldich による風化に対する火成岩の鉱物の安定度 (松井義人, 一国雅己: B メイソン: 一般地球化学, 岩波書店, p. 191 による)

前にも述べたが、降水は蒸発散量を除き、表流水、中間流出、地下流出となるが、これらはそれぞれの地質条件と水との反応のなかで、一般的には溶存物質が上記の順序で増加することとなる。

具体的な例についてみてみよう。

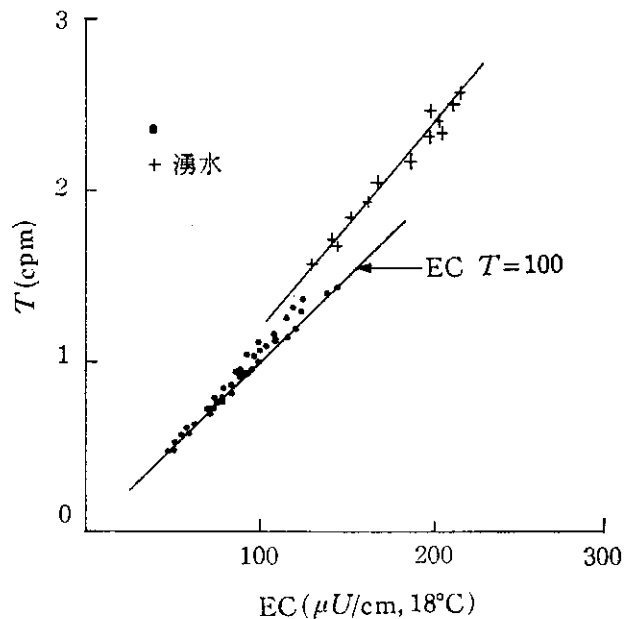


図-3 電導度 (EC) と溶存イオン総量 (T) との関係
兵庫県六甲山地の沢水と湧水 鶴巻による

図-3⁴⁾ は、兵庫県六甲山地の沢水と湧水の間を溶存イオン総量 T (cpm) と電導度 (EC) の関係で表わしたものである。

湧水と沢水の水質の関係が、はっきり区別できることが注目される。他の具体例については後に述べる。

このような現象を逆に水に溶存している元素やイオンの側からみるならば、その特徴から地質条件を推定することが可能となり、水質に注目することにより地質調査、施工条件の設定に役立つものと考えられる。

2-2 トンネルと地下水の水質

地下水面下を掘削するトンネル工事において、地下水とのかかわりは避けられない。

トンネルへの湧水は、一般に次のような問題をもたらす。

- ① 地山の性状を劣悪にし、作業能率、坑内運搬能率を著しく低下させる。また、出水の著しい場合は安全と経済性における非常な困難をもたらす。
- ② 地圧を大きくする原因となる。
- ③ 地表面現象として、湧水や水質汚濁の問題を生ずることがあり、状況によっては大きな社会問題となることがある。

上記のような理由により、トンネル工事では、掘削における地下水の挙動に関する情報を的確に得て、湧水や湧水の規模をできるだけ予測したり、因果関係を明らかにすることが望まれる。

もっとも「トンネルは地質次第」とかいわれるように、これまでの工事の実績から地質と湧水量についての

関係などについての一定の関係が見いだされているものもあるが、一般にはこの問題について複雑な条件がからみ、むずかしいことが多い。

そのために、トンネルの湧水に関する事前調査にあたっては、地質調査はもちろん、降水量、河川流量、地下水位など広い領域の水文調査の流れ図も提案されている⁵⁾。

このようにトンネルの湧水については総合的な調査が必要であるが、ここでは、トンネル湧水の水質にみる調査、設計、施行についての代表例を文献をもとに紹介したい。

(1) 青函トンネル坑内水の水質⁶⁾

青函トンネルは世界でもはじめての長大海底トンネル工事であるが、海底下のトンネルという点で無限の湧水の可能性がめり出水の危険性についての調査、対策が十分行われた。このなかで湧水の化学分析も調査段階の昭和40年から現在も行われており、興味ある結果が得られている。

ここでは、坑内湧水の水質パターンをそれぞれの地層と関連づけて地球化学的に検討した結果、次のように湧水型を分類している。

- 1 現代海水直接浸透型湧水
- 2 マグネシウム富化海水浸透型湧水
- 3 カルシウム富化型高塩分変質水
- 4 硫酸塩豊富型湧水
- 5 硫酸塩欠乏型湧水

これらの湧水型は、その水質の特徴を表象したものであるが、それぞれの地下水水型は、これが胚帯する地質と密接な関連を有している。

1 現代海水直接浸透型湧水は、透水係数が高くイオン交換能の小さい砂岩性の地層を短かい接触時間で浸透してきたと考えられる湧水群である。

2 カルシウム富化型高塩分変質水は、玄武岩、安山岩の貫入帯と密接に関連していると考えられる。このグループの湧水は海水起源であるとしても、古代海水が地下水と混合しながら新第三紀層年代を経て変質を受けた変質地下水と考えるのが妥当であろう。

3 硫酸塩豊富型湧水は、玄武岩貫入部付近の熱水変質地帯に滞水していると思われる深層地下水である。このグループの湧水が出現した近傍は熱水変質粘土帯の存在が高い確率で予想され、熱水変質膨脹性粘土による変状の危険が予測される。

(2) 新青山トンネルの水質⁷⁾

新青山トンネルは、三重県鈴鹿、布引の分水界山脈を貫く5690mの単線鉄道トンネルである。このトンネル

の地質は、強い広域変成作用を受け花崗岩に近い性質をなす変成岩類と花崗岩類よりなる。このトンネルではこれとほぼ平行し、上部に位置する既設のトンネルを含め、地表水と湧水の分析が行われ、地表水と地下水の鉛直(深さ)方向の水質の変化についての検討が行われた。結論の要約は次のようである。

1 トンネル湧水は、各種湧水を通じて水-岩石-風化生成粘土との相互作用から、とくに HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} などの溶出イオンに顕著な特性が見いだされる。

2 断層湧水は、本地域の母岩が水と炭酸ガス作用による風化に起因する溶出 Ca^{2+} と生成 HCO_3^- とに特徴があり、 HCO_3^- , Ca^{2+} とも高い濃度を示している。

3 滞留水は、 HCO_3^- の濃度が高いにもかかわらず Ca^{2+} の濃度増加が見られず、むしろ HCO_3^- の増加に反して Ca^{2+} が減少している一方、 Na^+ が著しく増加している。

4 滞留水に断層水が混入したと思われる湧水は、断層水(富 Ca^{2+})と滞留水(富 Na^+)とを両端成分とした混和成分を示し、混入度によって成分が線形連続変化するパターンをとっている。

5 滞留水、断層水の溶出成分量比、とくに $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Na}^+ + \text{K}^+/\text{全陽イオン}$, K^+/Na , $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$ の諸比は前者と後者の差異はきわめて顕著で、滞留水の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+} = 12 \sim 100$, $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2 = 4.0 \sim 5.9$ であるのに対し、断層水はそれぞれ0.7~2.0, 1.5~3.0とはるかに小さい値を示している。これは、単に水-岩石風化作用だけでは説明できず、風化による生成粘土と滞留水のイオン交換、さらに滞留水にはしばしば CO_3^{2-} の存在することから Ca^{2+} の反応系外への逸脱を示唆している。

6 滞留、断層兩種水の海拔に基づく鉛直方向の成分変化は、断層湧水の変化率が数値ならびにその増減方向とも変動が激しいのに反し、滞留水のそれは値が小さく、かつ安定している。とくに滞留水は下方に向かって Na^+ が単調に増加し Ca^{2+} が減少するのに対し、断層水は上部で Na^+ , Ca^{2+} の増減およびその勾配に乱れがあるが下方にいくにしたがって滞留水と同一傾向を示している。このことは、断層水は地表近くの上部では移動(流下)が速く、その組成の変動も激しいが、下方では移動が遅く反応の熟成が進み、漸次、滞留水に類似していくことを示唆している。

7 滞留、断層兩種水の経月変化については施工の関係上資料が乏しいが、全般に成分変化はきわめて微量である。しかし、時間とともに Na^+ の減少および Ca^{2+} の増加が見られ湧水流出による地下水の降下移動が生じ、水-岩石相互作用とくに風化作用が進んでいること

を示している。

8 湧水の電導度は溶解イオン量によって支配され、概括的に反応熟成度を、また、pH は当地域では Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} が少ないため、湧水の含有 CO_2 と母岩鉱物との化学反応に基づく HCO_3^- 、 CO_3^{2-} などの炭酸イオン量によって支配され、主として風化作用を表わすと考えられるので、pH と電導度 (ET) と現場における地質判断から兩種水の混和などの特殊な場合を除き、比較的簡易な湧水識別が可能であることを示した。

2-3 地すべり崩壊と地下水の水質

地すべり崩壊と地下水の関連は、切っても切り離せないことはいうまでもない。これについては、地下水位の上昇と移動土塊の運動が密接に関連することが経験的にも、理論的にも確かめられているところである。このため、地すべり・崩壊対策の抑制工の代表として、排土工と並んで地下水排除工があげられているのである。しかしながら、地すべり、崩壊地における地下水の実態について、とくに地すべり地の地下水の実態については、必ずしも解明されているとはいえず、というよりも不明なことが多いのが実状である。このため、地下水排除工が著しい効果を発揮することはあるが、必ずしも良好な効果をもたらすとは限らず、永久的な効果という点では問題があることも多い。この原因は、先に述べた地すべり地の地下水の挙動と実態に不明な点が多いこと、地下水と地すべり移動の関連および機構が明らかでないことによるものと考えられる。

地すべり、崩壊地の地下水調査については、こういう理由で総合的な調査が必要となるが、このなかで、水質の問題も地すべり、崩壊の実態を把握する上で重要な手がかりとなり得るものである。以下、文献にみる地すべり、崩壊地の地下水の水質について紹介する。

有泉⁸⁾は、国内の 15 の地すべり地の陸水の水質を調べ、次のような結論をだしている。「わが国の地すべり地帯にみられる陸水の水質」が「通常の河川などに比べて特に異常である場合が一般である。」「溶存成分としては CaSO_4 、 MgSO_4 の濃度が高く、 Mg/Ca も一般に高い値となっている。この傾向は第三紀層に起こる地すべりにとくに顕著に認められている。第三紀層以外の地すべりでは MO アルカリ度が高いことが一般である。水質は地すべり地帯に見られる地球化学的環境の帰結であり、平衡に達するまでの動的過程を表示する。したがって地すべり機構そのものも水質になんらかの形で反映し、地すべり地帯における粘土鉱物の生成および変成の環境も水質に反映すると考え得る。」「今後、地すべり地帯陸水の水質を組織的に詳細に研究し、とくに土質との

関連性を追求すれば、水質と地すべり現象との関連性も明確となり、防災計画のために水質を含めた地球化学的調査方法の意義を認めるにいたると考える。」

また、奥田など⁹⁾は、亀の瀬地すべり地を中心に多くの地すべり崩壊地の調査をもとに次のような結論を導いている。

「地すべり地とか崩壊地内の湧水は、一般に化学成分含量は高いが、母岩、風化形態などのさまざまな組合せに応じて、着目すべき元素は異なっているから、それぞれの地域に応じた基礎的な研究 (例えば、岩石の溶出実験、粘土のイオン交換量測定など) を十分に行う必要はあるが、ある地域内での相対的に風化の進んだ領域を見いだすのに、水質は有効に利用できる。」

3. 神居古潭帯に分布する蛇紋岩地帯の地下水の特徴

神居古潭帯は、北海道の中軸に南北に分布する変成帯であるが、この変成帯には数多くの大小の蛇紋岩帯が分布し、その総計の面積が 500 km^2 に及ぶことについては、前の報文で述べた¹⁰⁾。

さて、地下水の水質はそれを胚胎する地質、とくにそれを構成する化学組成に密接に関連するが、蛇紋岩は特殊な成因と化学組成を有するので、蛇紋岩分布地域の地表水も地下水も特殊なものとなっている。ここでは、神居古潭帯に分布する蛇紋岩と化学組成について概観してみる。

神居古潭帯の蛇紋岩は、大部分がかんらん石、斜方輝石を主とするハルツブルグ岩系の原岩が蛇紋岩化作用を蒙ったものが主であり、他に小岩体として単斜輝石を含むウェールライト系の岩体があることが知られている。したがって、ハルツブルグ岩系の蛇紋岩の化学組成についてみると、 MgO が極端に多いのに対し、 CaO が極端に少ないのが特徴であり、ウェールライト系の蛇紋岩についてみると、単斜輝石の $\text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 比はモル比で約 1:1 であるので、原岩のかんらん石と単斜輝石の量比によっても異なるが、 CaO 組成が相対的に多いのが特徴である。

上記のような蛇紋岩の化学組成を反映して、地下水はもちろん、地表水も特徴のあるものとなっているが、その主要な特徴を他の河川水などと対比して以下に述べる。

1. Mg 溶存量が著しく多い

蛇紋岩にかかわる地下水、地表水の Mg 溶存量が多いことは蛇紋岩の化学組成からも当然予測されることであるが、その絶対量は全国の主要河川水と比し 1 けた多い値を示している (図-4、5 参照)。また、一般的にいえば

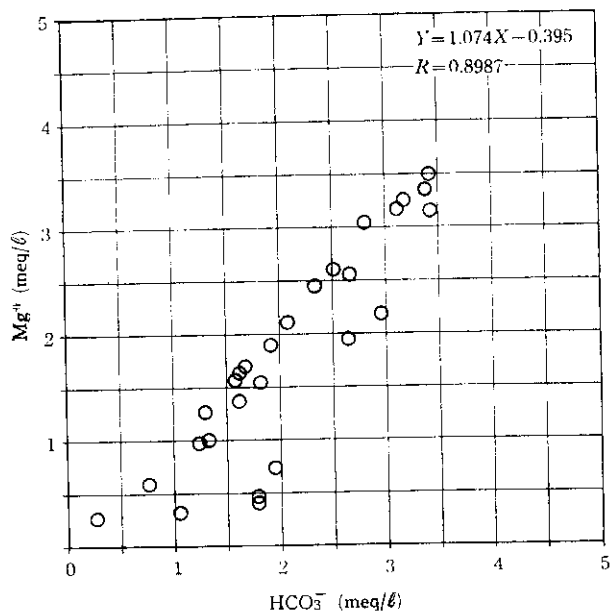


図-4

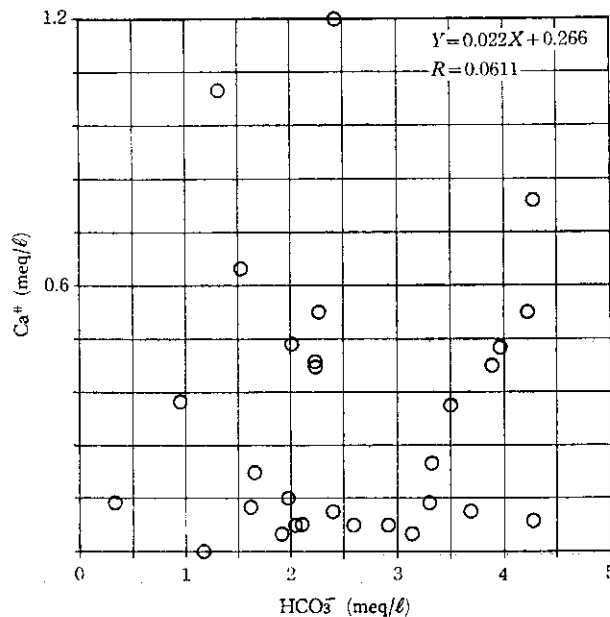


図-6

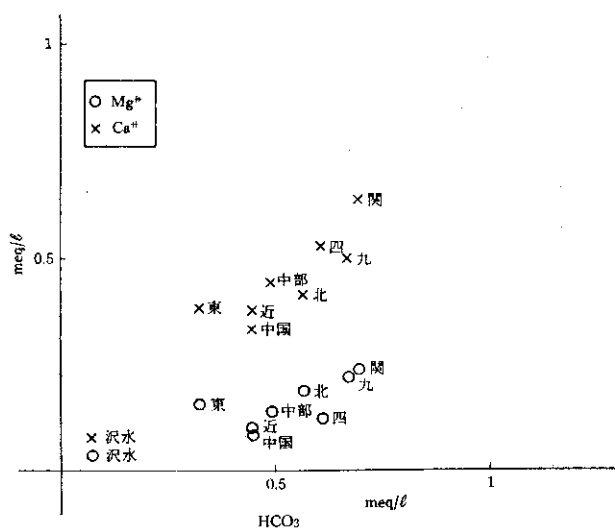


図-5 全国地方別河川水の水質

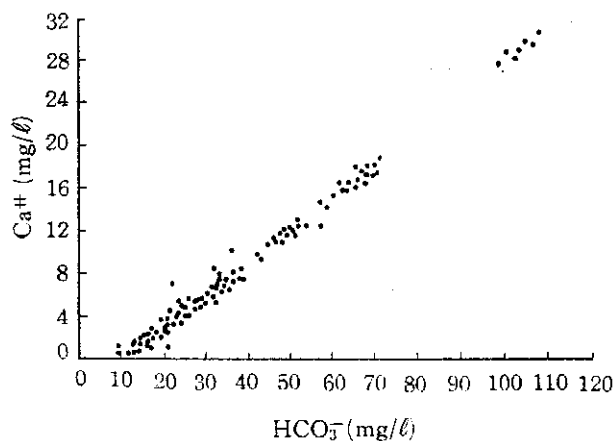


図-7 住吉川および芦屋川流域の河川水および湧水中の重炭酸イオン含量とカルシウム含量との関係

全国の主要河川の測定試料は中下流域の試料の平均値を示したものであり、上流域あるいはより上流の沢水のMg組成はさらに少ないMg組成を示すことが知られている。

2. 一般の陸水では、 HCO_3^- と Ca^{2+} の溶容量が比較的良好な比例関係を示すのに対し、蛇紋岩にかかわる陸水では Mg^{2+} と HCO_3^- の溶容量が良好な対応を示し、 Ca^{2+} については、むしろ HCO_3^- との対応は悪い(図-5, 6, 7参照)。

3. pHに対する Mg^{2+} および HCO_3^- 溶容量が比較的良好な対応関係を有する。

図-8および図-9は、神居古潭帯の蛇紋岩地域の地下水、地表水のpHに対する Mg^{2+} および HCO_3^- をプロッ

トしたものである。この両図ではpHに対するそれぞれの点が比較的広い領域をもって分布するようにみえるが、これらの点を詳細に点検すると、その地表水、地下水の産出状態によって、pHに対するそれぞれの組成が二群に大別されることがわかる。すなわち、pHに対する溶容量が比例関係として上部にプロットされる群と下部にプロットされる群である。このうち上部の群は、主として蛇紋岩のみに関連した水であり(図-10参照)下部の群は、蛇紋岩分布地域の緑色片岩、黒色片岩に関連した水である。

4. 蛇紋岩トンネルと地下水

これまで神居古潭帯の蛇紋岩に掘削された断面の大き

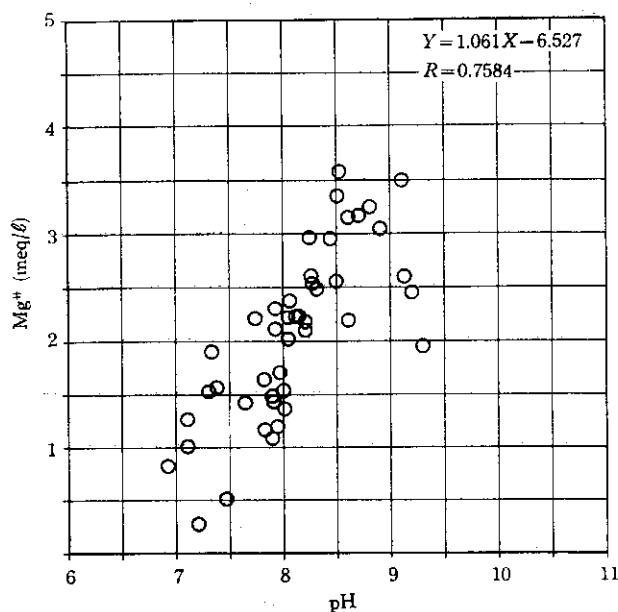


図-8

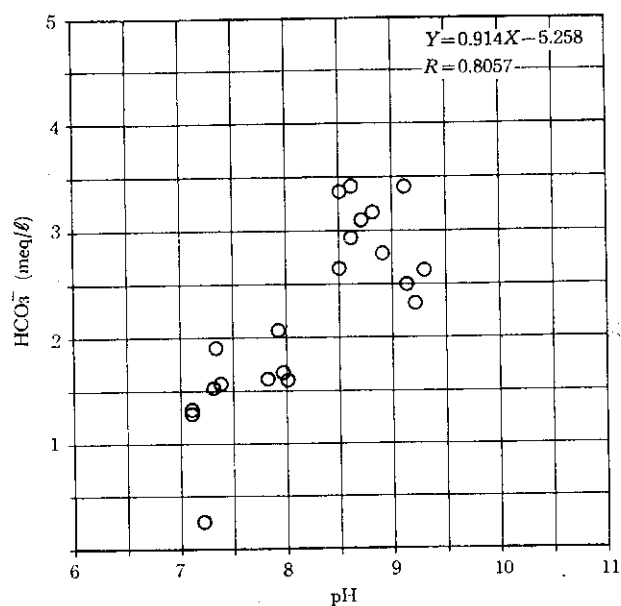


図-10

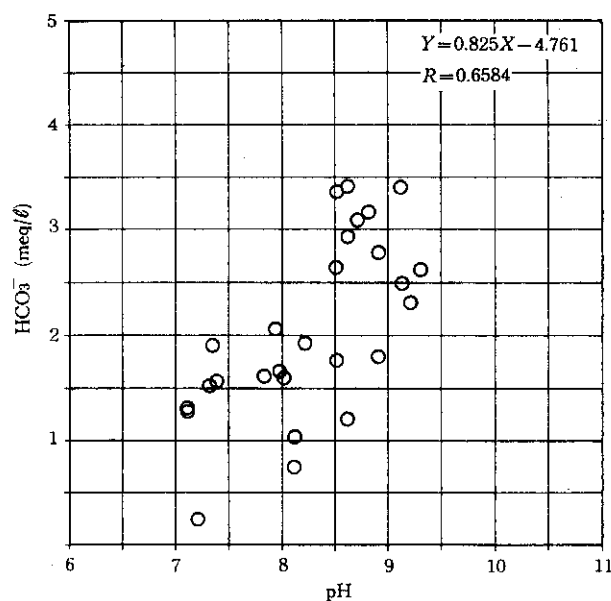


図-9

いトンネルとしては、国鉄函館本線神居トンネル、嵐山トンネル、同日勝線新登川トンネル、鬼峠トンネルがあり、大きい地圧などにより、難工事であったことが報告されている。現在北海道開発局では、農用水路トンネルである神竜幹線導水路トンネル、一般国道274号稲里トンネル、一般国道12号神竜トンネルが蛇紋岩を貫くトンネルとして施工中である。ここで、とくに地下水が問題となった神竜幹線導水路トンネル（以下、神竜トンネルと呼称する）の例について報告する。

このトンネルは、直轄かんがい排水事業の一環として、石狩川の神居古潭峡谷の右岸沿いに新設される延長

3.2 kmの水路トンネルである。トンネル工法は、地質に合わせて円型、馬てい型など3つのタイプが計画されているが、掘削断面は約25 m²である。

4-1 地 質

神竜トンネルの地質は、北海道の中軸を通る神居古潭変成帯の西縁部に位置し、蛇紋岩、黒色片岩、緑色片岩などよりなる。施工に先だって地質調査は、ボーリング、屈折法弾性波探査、磁力探査などが行われ図-11に示す地質断面図が作成されている^{12), 13)}。施工は53年度より実施され、今年5月中旬時点で上流側より800 m、下流側より1000 mの掘削が行われており、この掘削実績に基づき、一部地表踏査を加え筆者が解析したのが図-12の地質断面図である。2つの地質断面図の地質的特徴の大きな差異は、前者が垂直方向の構造を主とした解析となっているのに対し、後者が水平方向の構造が基本となっている点である。これは蛇紋岩の構造にとくに顕著であり、このため、計画上の蛇紋岩掘削区間が実績より少なく見積られている。このように、計画で予想された蛇紋岩区間が実績より少なく見積られたのは、隣接する国鉄函館本線神居トンネルでも同様であり、神居トンネルでは、蛇紋岩は全長の1/3と推定されていたが、掘削実績では1/2以上に及んだ。このような誤差を生んだ原因としては次のような要因が考えられる。

- ① 間接的な調査手段（弾性波探査を含む物理探査）では水平方向を基調とする地質構造を解析しがたいこと。同時に、このような間接的調査手段を補うボーリングなどの調査数量が少ないこと。
- ② これまでの神居古潭帯の地質構造、とくに蛇紋

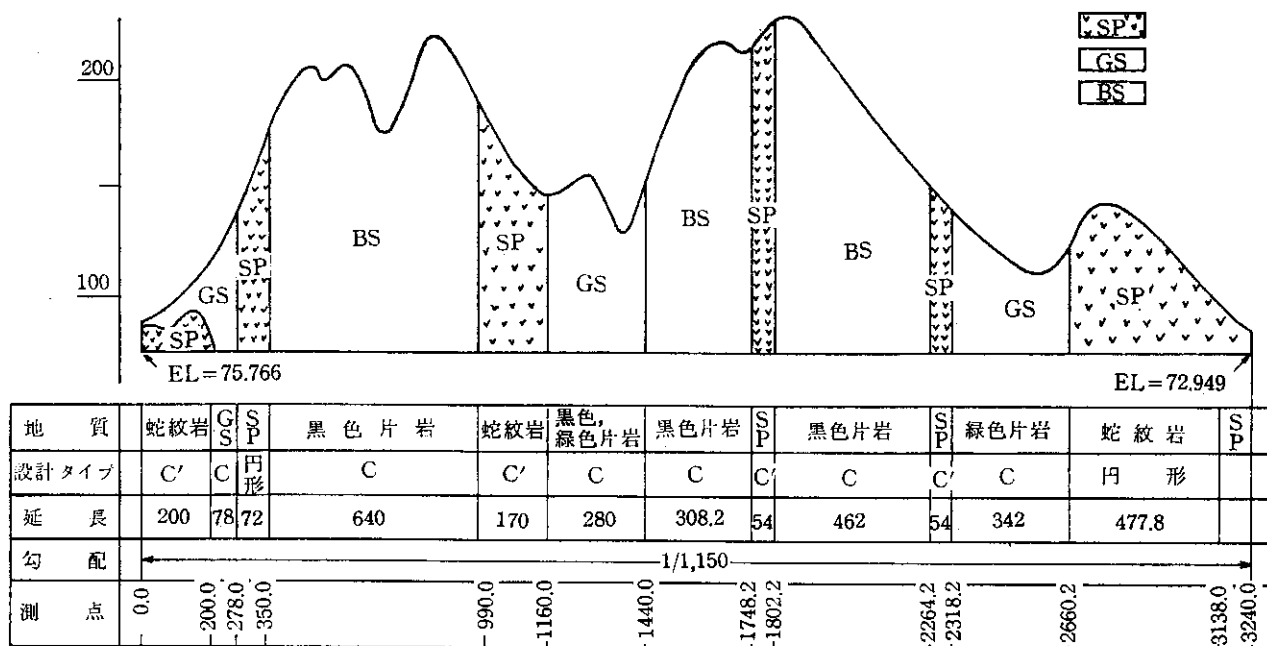


図-11 地質縦断面図

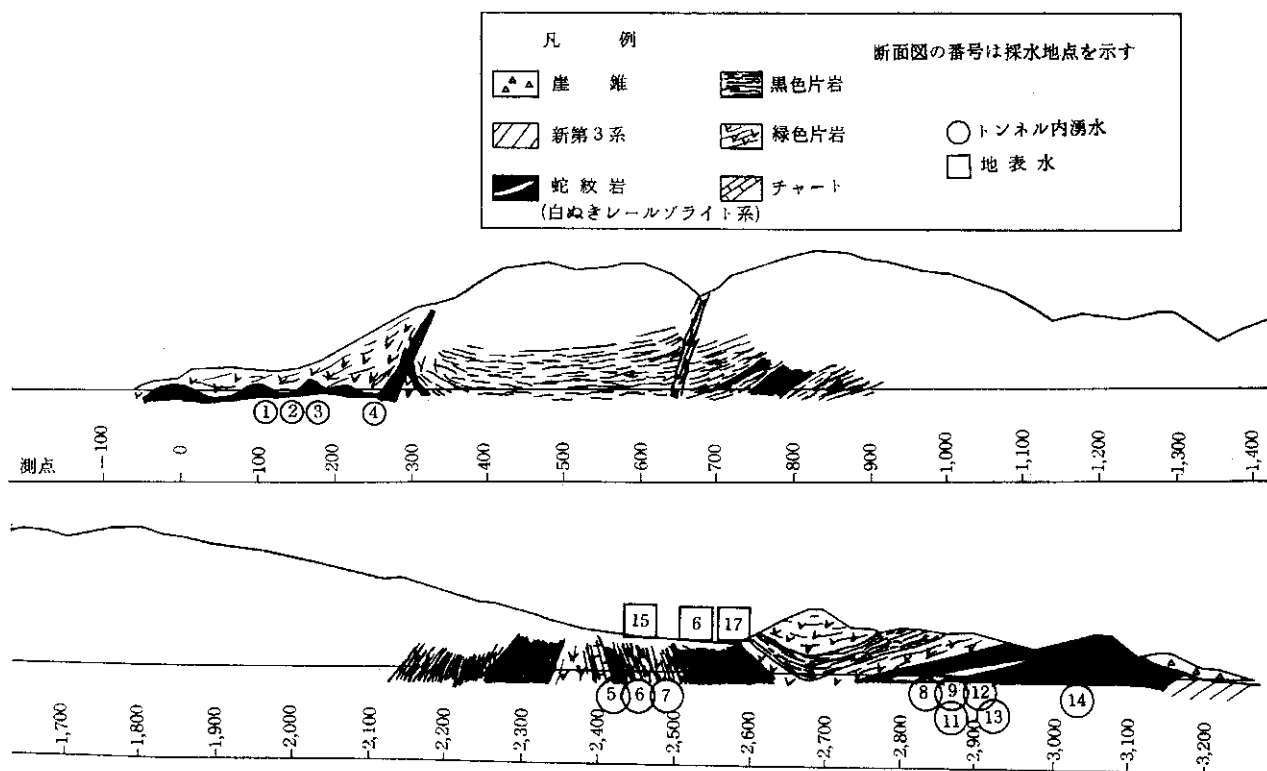


図-12 地質断面図

岩の地質構造を、蛇紋岩を一般の火成岩のように考えるために、垂直的に考える傾向があった。このため、少ない地質データからの地質解析が、垂直的地質構造を重視して行われる傾向となったことなど、

繰返しとなるが、このトンネルおよび神居古潭周辺で

は神居古潭帯の西縁にあたるため、水平方向の地質構造が基調であり、地質調査にあたっては地質構造に十分注意を払う配慮が必要である。

次に、トンネルに出現する代表的な地質を簡単に述べる。

a. 蛇紋岩

この岩石は、一般にトンネル工事に強大な地圧を発生させるということで注意が必要な岩石であり、岩質の違いにより掘削性や地圧に大きな違いをもたらすことから、同じ蛇紋岩であってもその岩質の判別は工事の難易性の判断にとっても重要である。なお蛇紋岩の分類については文献10)を参照されたい。一般にこのトンネルでは東より西に向かって片状性が強くなり、滑石の含有量も特殊な部分を除き東より西に多くなる傾向を有する。蛇紋岩の原岩は、一般に斜方輝石を含みぬウェールライト系のものであるが、一部に斜方輝石を有するレールズライト系の貫入岩があり、これが破碎され、帯水層となり、工事に問題をもたらした。これについては後で詳しくふれる。

b. 黒色片岩および緑色片岩

片状構造を有する比較的堅硬な岩石であるが、断層、破碎帯の周辺では、蛇紋岩が細脈状に入り地圧発生の原因となる例が多い。神竜トンネルでは、一般に水平方向の片理を有する場所で地山は安定しており、垂直方向の構造の場所(断層が多い)で不安定となる傾向にある。

4-2 神竜トンネルの地下水

神竜トンネルは、蛇紋岩を貫くトンネルであり、神居トンネル掘削の例などからも大きな地圧の問題は当然予想された。しかし、神竜トンネルは、神居トンネルより川側に位置するため、地圧に大きな影響を及ぼす土かぶりが小さいこと。また、神居トンネル施工時よりコンクリート吹付工法など、トンネル施工法の進歩により十分な準備と注意深い施工法を実施すれば、土圧についてのトラブルは克服できると考えられた。一方、景勝地としての神居古潭に近い路線となるため、土かぶりの小さいことが地盤沈下や地下水、地表水の涸渇などの環境問題への影響が懸念された。とくに、測点2,400~2,600 m間は神居古潭の中心に位置し、私有地公園として桜・紅葉の景勝地となっており、土かぶりが30~40 m程度と小さいこと、さらに、土地所有者との関係で弾性波、ボーリングなどの地質調査の立入りができなかったことから、前記問題を具体的に解決する必要にせまられた。

具体的問題としては、一部生活用水として使用されている沢水の涸渇の有無、地下水低下による池および桜の古木など植生に及ぼす影響、地表面沈下などである。また、トンネル掘削時に、これらの点を考慮すると止水のための薬液の使用ができない、または制限されるという点も問題であった。このために、問題の工事区間の施工に際しては、先進ボーリングにより地質および地下水状況を調査することを前提に、既設施工区間および周辺地

表水の水質を調査するなどの予備的準備を実施した。また、問題の区間にいたる手前の測点2,892地点で蛇紋岩を掘進中に突発的な出水事故があり、幸い人身事故はなかったが、出水に伴って約180 m³の土石状の岩が押しだした。この崩落は、水抜および薬液注入により基本的には突破されたが、その区間は70 m以上に及んだ。そのほかでは、蛇紋岩からの湧水は一般に少なく、これまで湧水に関連しトンネル掘削上とくに問題となった地点はない。

以下、掘削上地下水との関連でとくに問題となった2区間についての地質の詳細について述べる。

SP 2892~2822 区間

この区間は、下流側吐口より約300 mのSP 2892地点で、葉片状滑石質蛇紋岩を掘削中、切り羽上部より土石流状に約180 m³の崩壊が発生し、毎分120 ℓの湧水が続いた。

現場では応急のストッパーを設け、図-13のような水抜ボーリングと水ガラスによるグラウトを実施することにより突破した。このような区間はSP 2892~2822の約70 mの区間におよび、この間を三区間に分けたグラウト工が実施された。一般に蛇紋岩体中の地下水は少なく、とくに葉片状蛇紋岩のように軟質ないし粘土状化したなかでは少ないことから、このような出水を伴う崩壊は異例であった。なお、この区間の工事の詳細については、文献13)を参照されたい。

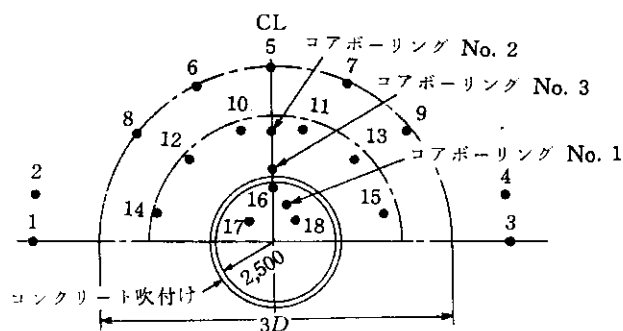


図-13 注入範囲 (ボーリング孔配置図)

調査の結果、この出水を伴う崩壊の原因は地質的に説明されることが判明した。

① 帯水層は、著しく破碎を受けたレールズライト系の貫入岩であり、砂礫状に破碎は受けているものの、粘土化はまぬがれていること。

② この破碎岩が神居古潭帯としては著しい水平構造を呈していること。すなわち、SP 2892付近より緩い上流落ちの傾斜で天端より入り込んできたレールズライト破碎岩と葉片状滑石質蛇紋岩の境界が、多少の波形は示

すものの常に鏡に現われ、上半ショートベンチ工法による掘進で、一部でわずかに境界が下半部に及ぶものの、大部分は上半を通り、SP 2822 付近より天端上部にぬけるほどの水平構造をとっていること。

以上のような地質構造、ウェールライトを原岩とする葉片状滑石質蛇紋岩が不透水層に、レールズライトを原岩とする破碎岩が蛇紋岩化を少なく受けているために、滯水層として常に流動しやすい条件にあったということが、難工事区間を長くした。

SP 2600～2400 区間

この区間は、先にも述べたようにかぶりも薄く、一見地すべり様の地形を有し神居古潭の景勝地の中心であることなどから、先進ボーリングによる地質状況の確認を実施すると同時に、とくに念入りの施工が実施された。

地質的にみると、地質構造は下流落（東落）の比較的急な傾斜を示し、地質は SP 2600 から 2520 付近までは SP 2615 付近より続く含滑石葉片状蛇紋岩が分布し、順次上流側に、黒色片岩、緑色片岩、チャートおよびこれらの互層が分布し、SP 2460～2440 付近に一部蛇紋岩が分布する。先進ボーリングの結果、比較的多量の湧水が見られ、掘進が進むにつれ最大百数十 ℓ/分 に達した。このため、前記のような問題がさらに懸念された。

このトンネルに関連して水質分析された試料の分析値は表-3 のとおりである。

これらの試料の採水場所については、図-12 を参照されたい。試料番号 5, 6, 7 は、先進ボーリングよりの湧出水であり、15, 16, 17 は、問題地点の沢および池より採水した地表水である。また、試料番号 8～13 は、測点

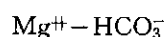
表-3

		1	2	3	4	5	6	7	8
pH		8.6	8.1	8.9	8.1	8.2	8.5	8.5	8.6
導電率	μU/cm	160	82	170					470
ナトリウム	mg/ℓ	4.4	3.0	10.1	3.4	9.9	29.2	34.0	21.6
	meq/ℓ	0.19	0.13	0.44	0.15	0.43	1.27	1.48	0.94
カリウム	mg/ℓ	0.88	0.53	1.98	0.48	0.28	0.84	0.84	13.8
	meq/ℓ	0.02	0.01	0.05	0.01	0.00	0.02	0.02	0.35
カルシウム	mg/ℓ	12.8	6.74	10.79	20.77	24.08	8.70	8.45	15.82
	meq/ℓ	0.64	0.34	0.54	1.04	1.20	0.43	0.42	0.79
マグネシウム	mg/ℓ	11.92	7.15	19.08	3.85	8.98	5.76	5.12	38.34
	meq/ℓ	0.98	0.59	1.55	0.32	0.74	0.47	0.42	3.15
硫酸イオン	mg/ℓ	17.5	6.2	15.7	1.045				10.5
	meq/ℓ	0.36	0.13	0.33	0.02				0.22
塩素イオン	mg/ℓ	6.7	6.3	6.5	6.8	8.6	12.7	12.7	34.6
	meq/ℓ	0.19	0.18	0.18	0.19	0.24	0.36	0.34	0.98
重炭酸イオン	meq/ℓ	1.217	0.755	1.810	1.045	1.938	1.778	1.770	3.419
鉄	mg/ℓ	ND(0.01	ND(0.01	0.08					0.31
	meq/ℓ	未満)	未満)						
ケイ酸	mg/ℓ	9.8	10.0	15.7					28.0
	meq/ℓ								
アルミニウム	mg/ℓ	0.04	ND(0.01	0.01					0.89
	meq/ℓ		未満)						

		9	11	12	13	14	15	16	17
PH		8.9	8.5	8.7	8.8	8.6	7.2	7.10	8.0
導電率	$\mu\text{U}/\text{cm}$	350	430	380	380	300		133	210
ナトリウム	mg/ℓ	10.4	11.2	9.8	10.8	4.2	3.7	4.1	4.9
	meq/ℓ	0.45	0.49	0.43	0.47	0.18	0.16	0.18	0.21
カリウム	mg/ℓ	2.25	1.50	1.05	1.65	0.80	0.38	0.85	0.75
	meq/ℓ	0.06	0.04	0.03	0.04	0.02	0.0009	0.02	0.02
カルシウム	mg/ℓ	6.65	10.74	8.35	9.21	1.71	2.25	3.6	9.34
	meq/ℓ	0.33	0.54	0.42	0.46	0.09	0.11	0.18	0.47
マグネシウム	mg/ℓ	37.09	40.71	38.54	39.57	26.66	3.27	12.3	16.64
	meq/ℓ	3.05	3.35	3.17	3.25	2.19	0.27	1.01	1.37
硫酸イオン	mg/ℓ	14.6	5.0	9.7	3.4	14.6		1.9	15.4
	meq/ℓ	0.30	0.10	0.20	0.07	0.30		0.04	0.32
塩素イオン	mg/ℓ	16.0	30.8	28.6	35.3	19.3	9.7	8.2	12.4
	meq/ℓ	0.45	0.87	0.81	1.00	0.54	0.27	0.23	0.35
重炭酸イオン	meq/ℓ	2.790	3.374	3.103	3.171	2.393	0.256	1.320	1.607
鉄	mg/ℓ	0.02	0.02	ND(0.01	0.01	0.01			0.03
	meq/ℓ			未満)					
ケイ酸	mg/ℓ	13.6	10.4	8.2	10.4	0.9			13.8
	meq/ℓ								
アルミニウム	mg/ℓ	2.0	0.47	2.6	0.18	0.12			0.21
	meq/ℓ								

2892～2822区間の崩落に伴う湧水、グラウト施工区間の切羽および排水ボーリング時の湧出水である。

以下、これらの分析値の各イオン、pHなどの関係について述べる。



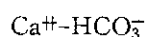
$\text{Mg}^{++}-\text{HCO}_3^-$ の関係は、蛇紋岩地域の陸水で特徴的なものであることについてはすでに述べたが、表-3の $\text{Mg}^{++}-\text{HCO}_3^-$ の関係をプロットしたのが図-14である。この図から次のような特徴が読みとれる。

① $\text{Mg}^{++}-\text{HCO}_3^-$ の関係が、きれいな直線関係にある一群と、これからはずれる一群がある。直線からはずれる一群は、SP 2503よりの先進ボーリングからの湧出水で、この湧出水の分析値を取り除くと、図-15のようになり、相関係数は0.97となり、非常に有意である。

② 図-15の直線関係にある群のうち、右上方の一群

はSP 2892付近の土石流地点およびこれに対する水抜ボーリングよりの湧出水であり、左下方には表流水および表流水が直接流入したと考えられるトンネル内湧出水である。なお、表流水が直接流入したと考えられる根拠としては、土かぶりが小さく、緑色片岩、黒色片岩よりなるトンネル内岩盤のわれ目に表土の付着がみられる点があげられる。

③ SP 2503地点からの先進ボーリングからの湧出水が、上記直線関係にある一群からはずれ、 HCO_3^- に対し Mg^{++} が相対的に少ない関係にある。これらは Ca^{++} を他と比し多量に含むことがこの原因の1つであるが、 Ca^{++} の溶存量を加えた値をプロットすると、前記直線に近づくがこれらの点もまだ全体より低い値となっている。



$\text{Ca}^{++}-\text{HCO}_3^-$ の関係を図-16に示した。

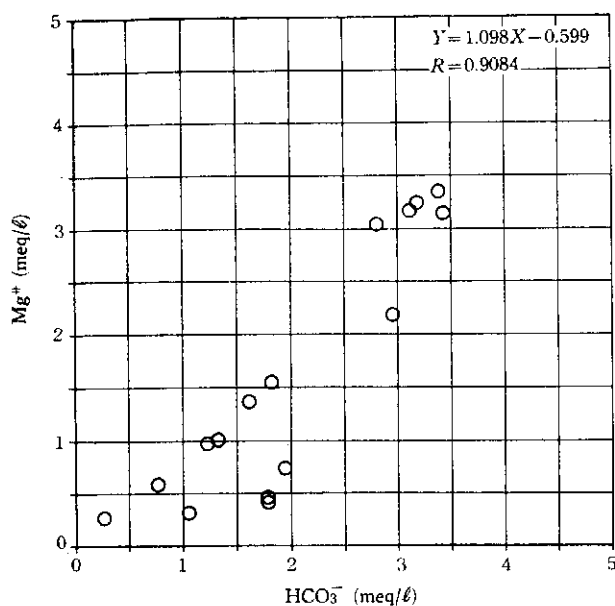


図-14

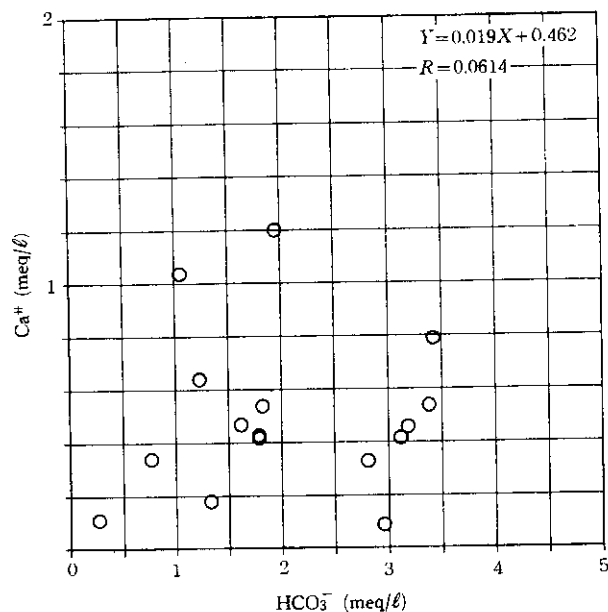


図-16

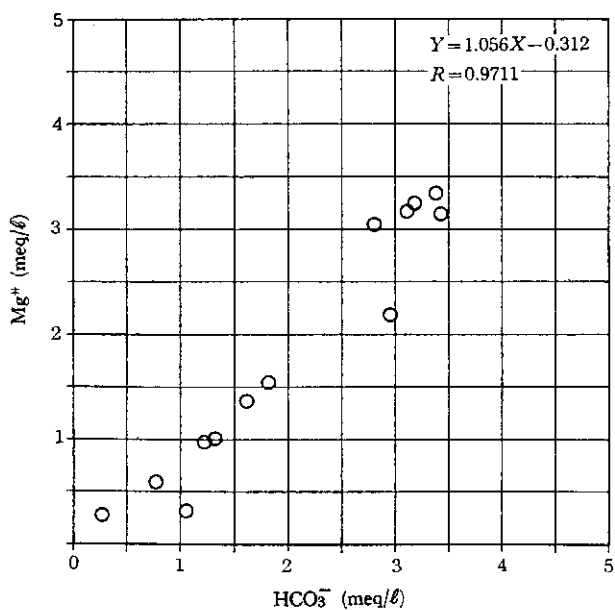


図-15

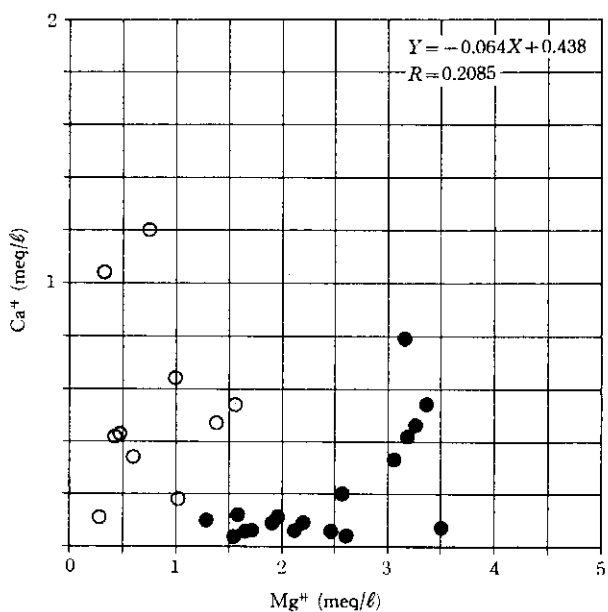


図-17

一般の陸水では Ca^{2+} - HCO_3^- の関係は、一般に比較的良好な比例関係がみられるが、この図ではそのような関係は認められない。産水場所により、各点が比較的まとまるのは試料水の HCO_3^- の溶存量によるものである。

Mg^{2+} - Ca^{2+}

Mg^{2+} - Ca^{2+} の関係を 図-17 に示した。

Mg^{2+} - Ca^{2+} の関係も、 Ca^{2+} - HCO_3^- の関係と似ているが、注目したいのは蛇紋岩のみの分布域からの湧水のなかで、崩落を伴う湧出水により工事が難行したレールゾナイト系の破碎岩からの湧出水が、当然のことながら Ca^{2+} に富んでいることである。ここではウェールライ

ト系の蛇紋岩からの湧出水の分析値は、No. 14 の 1 つだけであるが、これまで行われた他の地域での同系の地下水も No. 14 と同様に Ca^{2+} の溶存量は少ない (図-17 参照)。 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比が 1 より大きい No. 4, 5 は、方解石脈が発達していたり一部に石灰岩レンズを狭む黑色片岩からの湧水である。

pH- Mg^{2+}

pH- Mg^{2+} の関係を 図-18 に示した。この図では、各点の位置づけがはっきりしないが、蛇紋岩以外の岩石が分布する地点のトンネル内湧水の分析値をはずしたのが

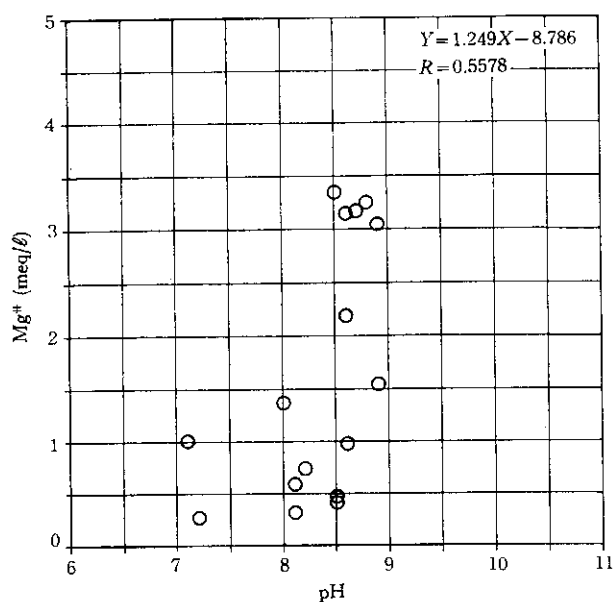


図-18

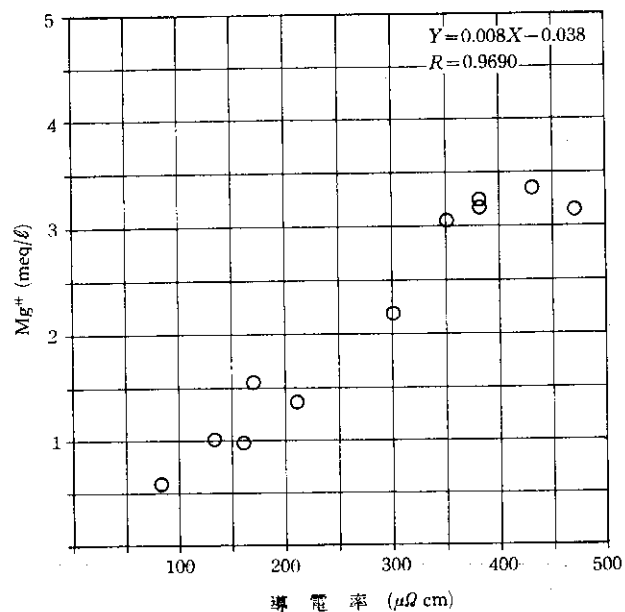


図-20

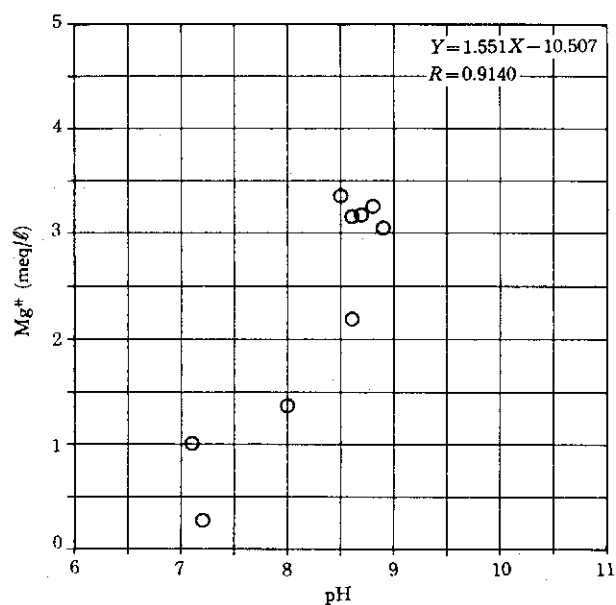


図-19

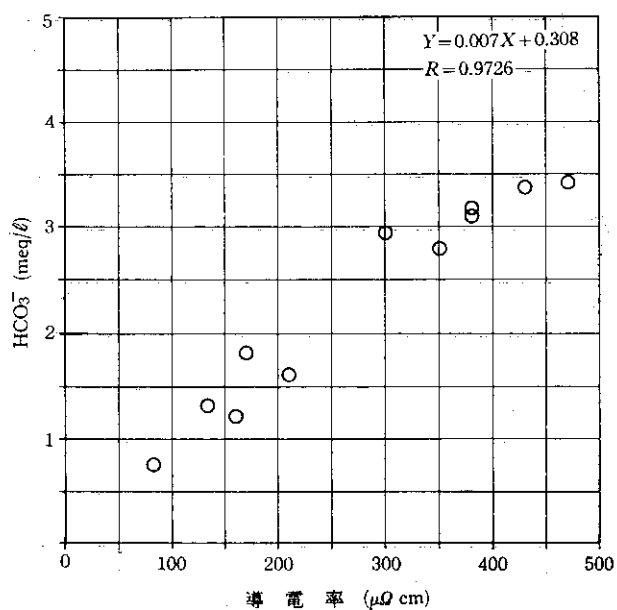


図-21

図-19である。これで見ると相関係数は0.91となり、前記トンネル内湧水は pH-Mg²⁺ の関係で特殊性を有するとみることができる。

導電率—Mg²⁺ および HCO₃⁻

導電率—Mg²⁺ および HCO₃⁻ の関係を図-20および図-21に示した。Mg²⁺ および HCO₃⁻ と導電率との相関係数は0.97を示し、自然界の事象としてはきわめて良い相関を有することがわかる。また、それぞれの図で見ると蛇紋岩のみ分布するトンネル内湧水は右上方に、緑色片岩、黒色片岩のかかわるトンネル内湧水、地表水は左下方に分布する。

一般に陸水では、導電率と溶存総イオン量との間に良い相関が見いだされることが知られているが、蛇紋岩地帯の陸水に呈める Mg²⁺ および HCO₃⁻ の割合が異常に高いことがここにみられる2つの相関係数に反映されたものと考えられる。

4-3 神竜トンネルの地下水分析値と土木工事

以上みてきたように、神竜トンネルで実施した陸水の分析値は、その産出状態や地質を強く反映していることが知られた。このなかで他の地質地帯の陸水と異なり、蛇紋岩地帯にあっては蛇紋岩の特殊な化学組成を反映し、Mg²⁺ および HCO₃⁻ の溶存量が重要な鍵となること

もはっきりした。

次に、トンネル内出水について問題となった SP 2,600 ~ 2,400 区間の水質についてみてみよう。この区間のトンネル掘削にかかわる問題については先に述べたので重複はさけるが、要点はトンネル掘削に伴う湧水が地表面の水系に問題となる影響を与えるかどうかという点であった。この問題に関しては事前調査として、地表水、かぶりの浅いトンネル内湧水の分析値と問題地点の先進ボーリングよりの湧水の水質が比較され、これによって次のような点が明らかとなった。

① 問題地点の地表水と先進ボーリングからの湧水では、pH および溶存イオン量に表-4 のような絶対値の差がみられた。

表-4

項 目	地 表 水	先進ボーリング湧水
pH	7.2~8.0	8.2~8.5
Na ⁺ mg/ℓ	3.7~4.9	9.9~34.0
HCO ₃ ⁻ meq/ℓ	0.256~1.607	1.770~1.938

② Mg⁺⁺-HCO₃⁻ の関係についてみると、図-14 にみられるように、このトンネルに関して分析された陸水のうち、先進ボーリングからの湧水のみがこれを取り除いた Mg⁺⁺-HCO₃⁻ の相関からはずれる。換言すれば、地表水と先進ボーリングからの湧水は、明らかに異なった水質の特徴を有する。一方、上流側坑口付近の土かぶりの浅い地点での地表水が直接流入していると考えられるトンネル内湧水は、地表水と同系列の Mg⁺⁺-HCO₃⁻ 関係にある。

以上のような水質分析の結果から、地表水と先進ボーリング湧水との間には直接的な流入関係はないものと判断した。したがって、慎重な施工によって地表水に影響を与えずにトンネル掘進が可能であると判断された。

トンネル掘削の結果は、心配された地表面の変状につきなんらのトラブルもなく問題区間を通過している。これにはこの区間の通過が表層が凍結している冬期間に行われたこと、コンクリート吹付工法の成功などが寄与しているものと考えられる。

以上は、このトンネル掘削にあたって実施された水質調査の直接目的の結果であるが、蛇紋岩トンネルの調査にあたっての多くの示唆が得られたと考えられる。そのいくつかをあげると、

a) 地質によってそのなかに胚胎する地下水の性質が特徴をもち、それが比較的簡単な Mg⁺⁺-HCO₃⁻、Mg⁺⁺-

Ca⁺⁺、pH-Mg⁺⁺ などの関係に表われる。

b) 導電率-Mg⁺⁺ ないし HCO₃⁻ の相関は、0.97 という非常に有意な相関係数を示している。

c) 地下水分析は迅速に、したがって大量に行うことが可能であり、比較的安価である。

これらは、逆に水質を分析することによって容易に地質を判別するのに役立つ可能性を示すものと考えられる。このことは一見なんの変哲もないことのようにみえるが、筆者には蛇紋岩調査にあたって見落せない条件に思われる。その理由は、これまで述べてきたように、蛇紋岩と特殊な物性を有するため土木工事の対象となる地質としては厄介な割に、この岩石の判別が土木技術者にとってなかなかむずかしいことである。とくに緑色片岩や破碎を受けた輝緑岩などとの区別は地質技術者でも、蛇紋岩を専門としていない者では間違った判断を行う場合があるほどなのである。

また、道路トンネルなど掘削断面の大きいトンネルでは、神竜トンネルの場合よりもはるかに正確な地質の把握が必要になるが、この際に先にも述べたように、神居古潭帯の地質構造が水平方向の要素に強く支配されているため、効率的な地質調査を行うためには先進ボーリングがきわめて有効な手段となると考えられる。この先進ボーリングに際しての地質情報として、これまで述べてきたように、水質分析はもっと重視されるべき要素を有するものと考えられる。

5. 蛇紋岩地すべりと地下水

北海道に分布する蛇紋岩地帯には、基盤となる蛇紋岩の岩質に応じ、いろいろな地すべり、崩壊が分布し、航空写真による判別によると、約 415 km² の調査面積に対し、65.3 km² に約 500 カ所の地すべり、崩壊が認められ、地すべり崩壊地の占める割合は 16% に及ぶという報告がある¹⁴⁾。

また、蛇紋岩地域の地すべりは、他の地質のそれと比べ、一般に対策が困難であるのが普通である。その原因としては、a) 蛇紋岩の物性値が、その特異な性質から捉えにくいこと、b) 水によって性質を敏感に変えること、c) 一般に排水が困難であることなどがあげられる。

ここでは蛇紋岩地すべりのうち、道路改良工事に伴い、昭和 41、46 年の 2 回にわたり地すべりが発生した茨内地すべりを中心に、近辺の蛇紋岩地すべりを含め陸水の水質について述べる。この地すべりの対策工法としては、排土、排水、抑止ぐい工法などが実施され、地すべりは安定し、現在にいたっている。対策工法の内容については、文献 16) を参照されたい。

5-1 茨内地すべりの地質

茨内地すべりは、音威子府の約1 km 西方に位置し、天塩川沿いの一般国道40号にかかる地すべりである。この地すべり地は、白亜紀層を貫き最大幅約2 km、長さ約25 km にわたって南北に分布する蛇紋岩体のほぼ中央部に位置する。この地すべり地付近では、この岩体は幅約1,200 m を有し、天塩川がこの岩体を東西に切るほぼ中央の左岸に位置し、幅約120 m、奥行約270 m、比高50 m の地すべりである。

以上述べたように、この地すべりの基礎地質は蛇紋岩を主とするが、ボーリングなどによるデータから地すべり地の地質を詳細にみると、以下のような特徴がみられる。

① 基盤は全盤に片状化が著しく、一種の構造帯に位置すると考えられる。

② 地すべり地の東端部の崩落崖には、南北に伸びる角閃岩の小岩体が分布し、これが後退変成作用により緑泥石片岩となっており、これを構成する緑泥石は、膨潤性を有する膨脹性緑泥石である。

③ 地すべり地の中心部分には、滑石—菱苦土石岩が分布し、これは蛇紋岩の岩酸ガス交代作用によって生成されたと考えられる岩石である。また、地すべり地の全域にわたってこの岩石が蛇紋岩中に脈状に分布する。

④ 地すべり崩土（移動土塊）は、主として蛇紋岩岩塊角礫を含む蛇紋粘土を主とし、この蛇紋粘土は当然のこととして滑石質である。この崩土中には、ボーリングコアの観察によると、ところどころに菱苦土石の沈澱物を狭んでおり、ここが崩土中の地下水の通路、いわゆる“水みち”であると考えられる。このような菱苦土石の沈澱物は、図-22 のように地すべりの中段から下段にかけて多くみられる。

⑤ 地すべり地の周辺の基盤は比較的塊状の蛇紋岩が分布し滑石も少ない。

5-2 茨内地すべりの地下水

この地すべり地の採水および化学分析は、次のような目的で実施された。

1) 蛇紋岩地すべり地の地下水の特徴を知り、蛇紋岩地すべりの調査に役立つ基礎資料を得る。

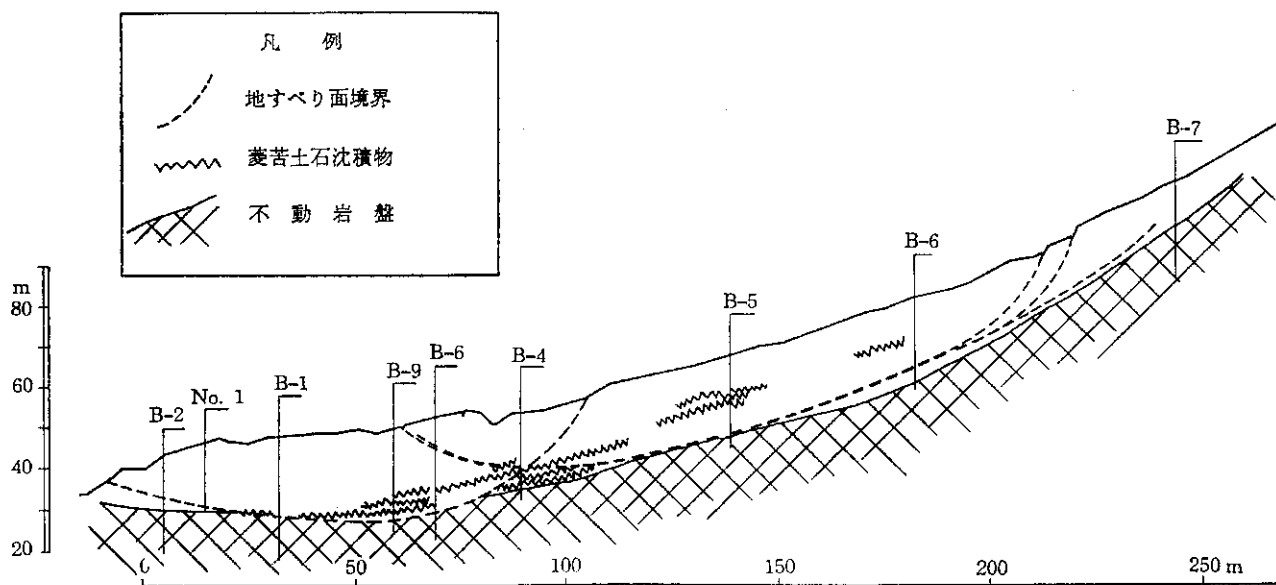


図-22 (a) 茨内地すべり地質断面図

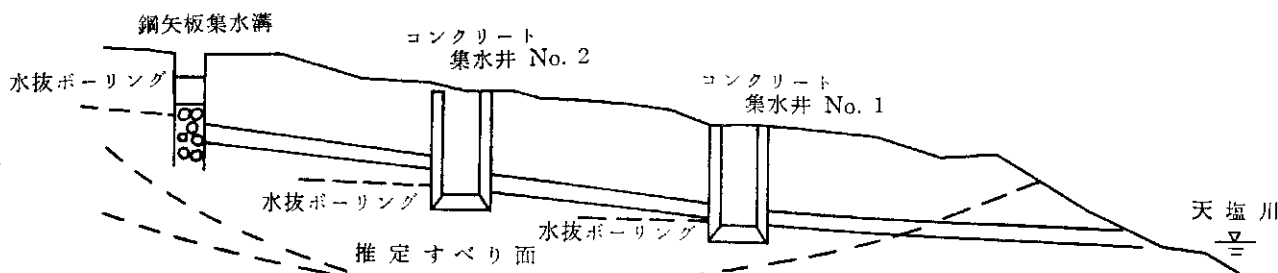


図-22 (b) 茨内地すべり集水工

表-5

	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
pH	7.92	9.10	9.20	9.12	9.29	7.96	7.81	7.37	7.30	7.10	7.33	8.49
マグネシウム mg/ℓ meq/ℓ	25.62 2.11	42.47 3.49	29.76 2.45	31.59 2.60	23.76 1.95	20.65 1.70	19.94 1.64	19.13 1.57	18.58 1.53	15.41 1.27	23.11 1.90	31.09 2.56
カルシウム mg/ℓ meq/ℓ	1.12 0.06	1.38 0.07	1.21 0.06	0.78 0.04	2.24 0.11	1.21 0.06	1.21 0.06	2.33 0.12	0.86 0.04	1.98 0.10	1.81 0.09	3.97 0.20
カリウム mg/ℓ meq/ℓ	0.50 0.01	0.42 0.01	0.30 0.01	0.35 0.01	5.02 0.13	0.44 0.01	0.42 0.01	0.67 0.02	0.53 0.01	0.48 0.01	0.80 0.02	0.96 0.03
ナトリウム mg/ℓ meq/ℓ	13.14 0.57	17.09 0.74	13.95 0.61	14.53 0.63	36.98 1.61	17.09 0.74	14.65 0.64	16.28 0.71	15.87 0.69	13.60 0.59	16.86 0.73	17.91 0.78
塩素イオン mg/ℓ meq/ℓ	6.16 0.17	9.89 0.28	5.42 0.15	8.86 0.25	11.63 0.33	8.65 0.24	6.91 0.20	8.55 0.24	6.91 0.20	5.63 0.16	8.33 0.24	9.49 0.27
硫酸イオン mg/ℓ meq/ℓ	10.66 0.22	5.22 0.11	t_r 0.00	t_r 0.00	t_r 0.00	t_r 0.00	0.42 0.01	1.67 0.04	t_r 0.00	2.09 0.04	t_r 0.00	t_r 0.00
重炭酸イオン mg/ℓ meq/ℓ	126.3 2.07	208.1 3.41	141.7 2.32	152.2 2.5	160.3 2.63	102.0 1.67	98.8 1.62	95.5 1.57	93.1 1.53	78.5 1.29	116.6 1.91	161.9 2.65
ケイ酸 mg/ℓ	7.500	0.893	0.179	1.964	0.179	27.946	13.214	10.268	16.875	11.785	16.071	11.696
酸可溶性鉄 mg/ℓ	t_r	t_r	0.03	t_r	t_r	0.19	0.03	t_r	0.07	t_r	t_r	0.06
アルミニウム mg/ℓ	nd	0.02	t_r	t_r	0.09	0.09	t_r	0.02	t_r	t_r	0.06	t_r

表-6

	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
pH														
マグネシウム	mg/ℓ meq/ℓ	26.90 0.512	27.09 0.512	28.95 0.512	26.52 0.512	36.12 0.512	28.04 0.512	25.52 0.512	27.00 0.512	10.12 0.512	27.19 0.512	4.42 0.512	17.40 0.512	30.94 0.512
カルシウム	mg/ℓ meq/ℓ	2.43 0.121	0.86 0.043	1.10 0.055	1.18 0.059	1.18 0.059	0.86 0.043	1.18 0.059	1.02 0.051	1.65 0.082	1.10 0.055	1.57 0.078	1.65 0.082	1.18 0.059
ナトリウム	mg/ℓ meq/ℓ	7.06	6.3	6.25	6.7	6.0	6.2	5.9	6.1	7.7	6.0	7.7	7.2	6.7
鉄	mg/ℓ meq/ℓ	1.530	0.083	0.179	0.096	0.064	0.217	0.396	1.002	0.989	0.543	0.409	0.077	0.989
アルミニウム	mg/ℓ meq/ℓ	0.08	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.21	0
ケイ酸	mg/ℓ meq/ℓ	25.39	20.99	10.32	5.59	6.05	2.20	5.16	4.65	16.16	4.06	12.69	14.72	0.42
pH														
マグネシウム	mg/ℓ meq/ℓ	43.54 3.581	31.75 2.611	30.33 2.494	24.57 2.021	17.59 1.447	13.26 1.090	18.25 1.501	20.87 1.716	14.26 1.173	14.64 1.204	17.97 1.478	35.98 2.959	
カルシウム	mg/ℓ meq/ℓ	1.57 0.078	2.04 0.102	1.18 0.059	1.73 0.086	2.43 0.121	2.67 0.133	1.96 0.098	2.04 0.102	1.73 0.086	1.80 0.090	3.53 0.082	1.65 0.082	
ナトリウム	mg/ℓ meq/ℓ	9.5	6.9	6.25	8.9	6.9	7.0	7.2	7.1	6.1	6.5	6.25	5.8	
鉄	mg/ℓ meq/ℓ	0.064	0.096	0.019	0.881	0.958	0.083	0.217	0.492	0.575	0.319	0.243	0.383	
アルミニウム	mg/ℓ meq/ℓ	0	0	0	0	0	0.08	0.13	0	0	0	0.243	0	
ケイ酸	mg/ℓ meq/ℓ	0.85	3.72	0.42	20.31	19.55	14.21	9.56	8.97	10.75	11.68	16.25	10.15	

2) 蛇紋岩地すべり地で、地すべり地内に流入する陸水（地表水および地下水）が、地すべり地の地下水として流下する過程で水質的にどのような変化を示すかを
知る。

以上の2つの目的を前提に、この茨内地すべりを中心

に、採水は昭和47、48年の2回行われた。

第1回は排水工法の終了直後の昭和47年10月で、採水の分析値を表-6に示した。第2回は、第1回採水の約1年後の昭和48年10月に実施した。この採水の分析値を表-5に示した。また、採水位置および産状は図-23

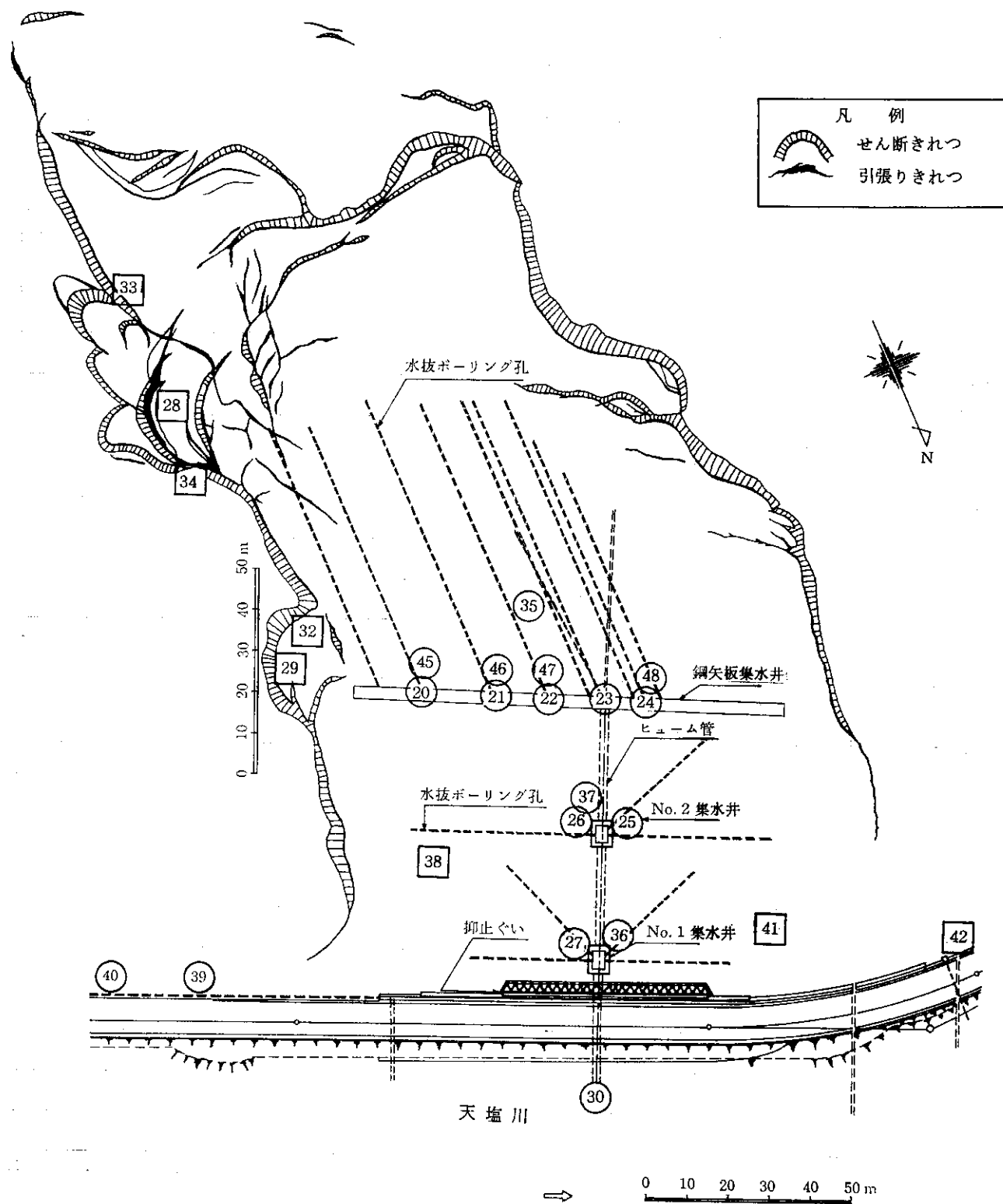


図-23 茨内地すべり平面図および分析試料採水位置図

に示した。

第1回と第2回の採水時の、地下水などの状況の特徴は次のようであった。

- 前後2回とも、秋雨前線などの活発な時期に相当し、調査時点での雨量は比較的多かったが、後者の調査時の方が前者に比して、水抜ボーリングからの湧水量は少なくなっていた。しかし、その後の状況の確認はされていないので排水工施工後の湧水の増減の傾向についてはわからない。なお、排水工施工前後の地すべり地の地下水位は数 m の差が認められ、排水工の施工効果が認められている。

- 後者の調査時点ではコンクリート集水井の水抜孔には、黄白色の沈澱物の付着が認められた。これは X 線回折の結果、苦灰石 ($\text{Mg} \cdot \text{Ca} \text{CO}_3$) であることが判明した。これは地すべり地内の“水みち”の沈澱物がすべて菱苦土石 (MgCO_3) であるのと異なった特徴である。

なお、分析値番号の 31. 43. 44 および 49~58 は、茨内地すべり近傍の陸水で、このうち 31 および 58 は蛇紋岩地すべり地の末端湧水であり、他は蛇紋岩分布地域の沢水である。

以下、分析値のイオン、pH などの関係について述べる。

$\text{Mg}^{++}-\text{HCO}_3^-$

$\text{Mg}^{++}-\text{HCO}_3^-$ の関係を図-24 に示した。図-24 から $\text{Mg}^{++}-\text{HCO}_3^-$ の関係がきわめて良い相関にあることがわかる。これを陸水の採取地点との関係でみると (図-22, 23 参照)。地すべり滑落崖から地すべり地内に流入する水が左下方に、中段の鋼矢板集水溝より地すべり地上段

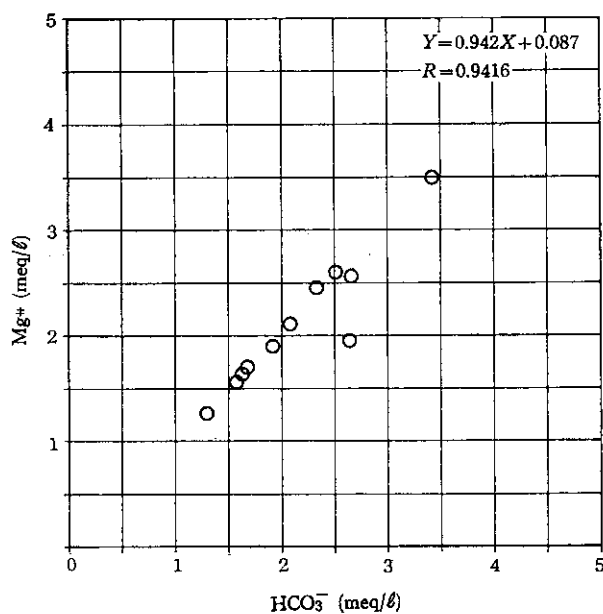


図-24

へ向けた水抜ボーリング孔からの排水が右上方に、下段のコンクリート集水井からの水抜ボーリングからの排水が前二者の間、詳しくはむしろ滑落崖より流入水に接近して分布する。また、この地すべり地からの全排水の平均値を示すと考えられる排水システム最下端の排水ヒューム管からの排水は、全体のはぼ中点に分布する。

pH- Mg^{++}

pH- Mg^{++} の関係を図-25 に示した。この図からもわかるように、pH と Mg^{++} の相関係数は 0.80 となり比較的良好であることがわかる。これをさらに地表水、地下水 (湧水を含む) の関係でみると、一部重なり合う部分

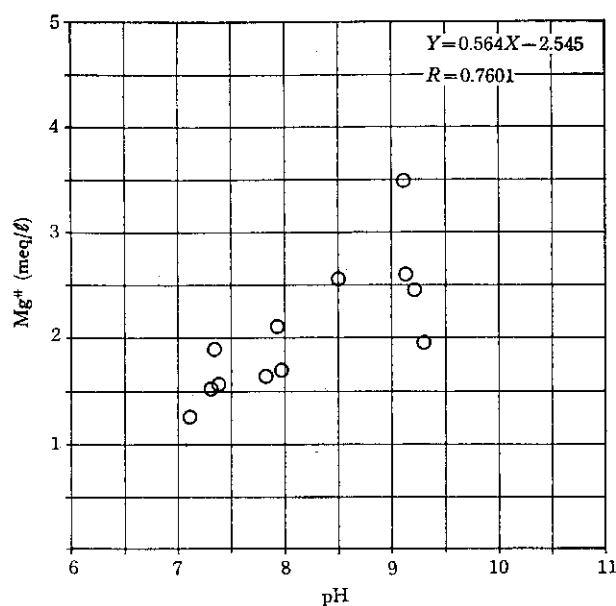


図-25

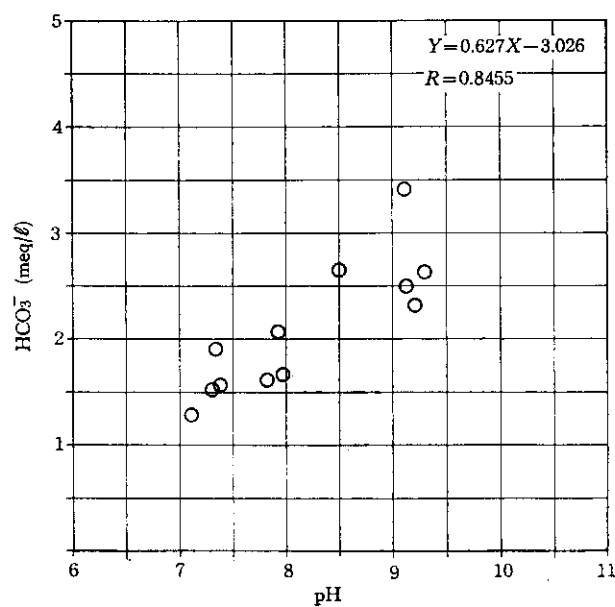


図-26

もあるが地表水は左下方に、地下水は右上方に分布することがわかる。

pH-HCO₃⁻

pH-HCO₃⁻ の関係を図-26 に示した。この相関係数は 0.85 となり良い相関を有することがわかる。HCO₃⁻ の分析値は、47 年度に実施した採水では欠けているので、点数は少ないが pH-Mg⁺⁺ の関係に似た相関を有するものと考えられる。

5-3 茨内地すべりの地下水分析値からの考察

これまでみてきたように、茨内地すべりの地下水の水質についてみると、Mg⁺⁺-HCO₃⁻、pH-Mg⁺⁺、pH-HCO₃⁻ などの項目について、神竜トンネルにおける蛇紋岩のみにかかわる溶存イオオンの関係とほぼ同一の関係にあると考えてもよさそうである。こういった意味で、これらの関係の大局的な傾向は蛇紋岩分布地の陸水の水質の傾向を示すものと考えてよいものであろう。ただし、神竜トンネルと茨内地すべりでは、相関式に見られるような多少の違いは、両者の蛇紋岩の岩質の違い、茨内地すべりでは滑石-菱苦土石岩の分布が前者に比し著しく多いことを反映しているものであろう。

さて、茨内地すべりの蛇紋岩地すべり地における特徴は、地すべり移動土塊中に菱苦土石よりなる“水みち”が発達していること、基盤、移動土塊ともに滑石が多量に存在することであった(図-22 参照)。なかでも、菱苦土石よりなる“水みち”の存在は、一般の蛇紋岩地すべり地においては困難な排水工が、ここでは成功した1つの大きな要因と考えられる。そこで、地すべり地における水質、とくに Mg⁺⁺-HCO₃⁻ の関係をもう一度振返えてみると、地すべり地に浸入した地下水は、Mg⁺⁺、HCO₃⁻ を溶解し、地すべり地中段に設置された鋼矢板集水溝からの水抜ボーリングからの湧水で溶存量がピークに達し、下段に設置されたコンクリート集水井からの水抜ボーリングからの湧水では、その溶存量を減少させているのである。これらの傾向は、47 年度に実施した水質分析の Mg⁺⁺ の溶存量についても、多少のばらつきはあっても同様の傾向が見られる。このような水質分析の結果と地すべり土塊の下段に菱苦土石よりなる“水みち”が多量存在することと合わせて考えると、地すべり中段より下段にかけて、地下水より菱苦土石を晶出させるなんらかの機構が存在するものと考えるのが妥当であろう。このような菱苦土石の晶出沈積の機構を考えると、これまでに幾度となく活動したであろうこの地すべりの活動の原因に、菱苦土石の沈積→“水みち”の閉塞→地下水位および間げき水圧の上昇という図式で表わされる要因が関与したのではなかろうか？。

しかし、一般の蛇紋岩地すべり地にあっては、菱苦土石による“水みち”存在の例はあまり報告がなく、この地すべり近傍に分布する蛇紋岩地すべり地の末端湧水では、Mg 溶存量は近傍の沢水に比し著しく多く、茨内地すべりの中段の溶存量に似た値となっていることも事実である。

6. おわりに

この報文では蛇紋岩の地下水の水質について、神竜トンネルと茨内地すべりの陸水を例に、土木工事とのかかわり、地質調査への応用または援用などについて述べてきた。もちろん、この2つの例によって蛇紋岩の地下水についての一般性を明らかにし得たとは筆者も考えていない。しかし、特異な成因と物性を有し、土木工事においてしばしば問題をもたらし蛇紋岩の地下水の性質の主たる傾向、また、地質調査手段としての有用性については多少なりとも明らかになったと考えられる。今後、蛇紋岩を対象とした土木工事はますます多くなるものと考えられる。蛇紋岩地域の陸水の性質の分析と解析が、多くの土木工事に活用され、多くのデータの積み重ねがこれについての一般性にまで高められ、さらにこの手法の有効性が高められることを期待したい。この際、この報文では筆者の非力のため取りあげ得なかった各種蛇紋岩と水溶液の溶存イオンの溶存関係、各種イオン溶脱による蛇紋岩自体の物性の変化(風化)と土木工事へのかかわり、化学的平衡論など実用面とともに、理論的分野の解明の必要性についても、さらに明らかにされねばならないことも当然であろう。

引用・参考文献

- 1) 地下水ハンドブック編集委員；地下水ハンドブック，建設産業調査会(1979)。
- 2) 北野 康，中村誠佑；山崩れと水質，土木施工，Vol. 6, No. 7 (1973)。
- 3) 北野 康；土木工学と地球化学，土木施工，Vol. 6, No. 7 (1973)。
- 4) 鶴巻道二；電導度による天然水中の総塩類濃度の推定とその水文地質学的研究への応用，日本地下水学会会誌，Vol. 15 (1973)。
- 5) 大島洋志；トンネル工事を対象とした水文調査のすすめ方，鉄道技術研究資料，Vol. 36, No. 8 (1979)。
- 6) 青山芳夫ほか3名；青函トンネル坑内水の地球化内水の地球化学的研究，鉄道技術研究資料，Vol. 36, No. 8 (1979)。
- 7) 三木一美，吉浦 甫；トンネル湧水の水質分析によるその発生形態同定について，土木学会論文報告集第 265 号 (1977)。

- 8) 有泉 昌；地すべり地帯陸水の水質について，土木研究所報告，No. 123 (1965).
- 9) 奥田節夫，吉岡龍馬；地すべりと地下水の水質，土木施工，Vol. 6, No. 7 (1973).
- 10) 野地正保；蛇紋岩と土木工事（第1報）—蛇紋岩と蛇紋岩化作用—，土木試験所月報，No. 303 (1978).
- 11) 北野 康，中村誠佑；山崩れと水質，土木施工，Vol. 6, No. 7 (1973).
- 12) 竹内兼蔵ほか3名；神竜幹線導水路の施工について，第24回北海道開発局技術研究発表会論文集 (1980).
- 13) 斉藤重一ほか4名；膨脹性蛇紋岩を掘る—神竜幹線導水路トンネル，トンネルと地下，第12巻7号 (1981).
- 14) 野地正保，鈴木哲也；北部北海道に分布する蛇紋岩地域の地すべり崩壊地形，地すべり学会第16回研究発表会予稿集 (1977).
- 15) 鈴木哲也，野地正保；南部北海道に分布する蛇紋岩地域の地すべり崩壊地形，地すべり学会第16回研究発表会予稿集 (1977).
- 16) 上坂 勉，寺内祥作；茨内地すべり対策工事について，第18回北海道開発局技術研究発表会論文集 (1974).

*

*

*