

ダム周辺の長期的地下水位および水質変動に関する一考察

Study of the Long-term Change of Groundwater Level and Water Quality in the Vicinity of a Dam

塩崎功*、高木不折**、松林宇一郎***、向上祐美****

By Isao SHIOZAKI, Fusetsu TAKAGI, Uichiro MATSUBAYASHI, Hiromi KOJO

This paper describes the groundwater movement indicated by the results of a long-term investigation of the leakage volume, groundwater level and water quality measured since the initial filling of the reservoir. Main results obtained from this investigation can be summarized as follows : 1) The leakage volume tends to decrease with time. In particular, the leakage volume at measuring points where leakage was considerable at initial filling decreased remarkably. 2) The difference in the ratio of transmissivity of the rock mass showed that the sealing zone built during dam construction was functioning soundly. Furthermore, the variation with time of the ratio of transmissivity showed that a natural sealing zone was formed near the reservoir by siltation. 3) The variation of the water quality of groundwater showed that the seepage water from the reservoir arrived at the downstream side after more than one year from the start of filling.

Keywords: dam, leakage water, groundwater level, water quality, transmissivity

1. はじめに

ダム湛水時にトラブルが発生する確率が最も高いのは初期湛水の時である。したがって、ダム湛水に伴う周辺地下水流動の調査は、試験湛水時において細心の注意と綿密な計測計画の元を実施される。しかし、試験湛水が無事に終了した後は、ダムの維持管理段階に移行し、安全監視を目的に多くのダムで種々の計測が長期間実施されているにもかかわらず、得られたデータを用いてダムの長期的な健全性が評価されることは意外に少ない。

近年、ダムの立地点が限定されつつあり、ダム基礎岩盤としての透水性が確保できない地点にダムを建設せざるを得ないことも多い。したがって、今後建設されるダムにおいては、初期湛水が無事に終了したとしても、基礎岩盤の健全性を長期的に監視することの重要性は非常に高いと言える。

一方、湛水後は上流側に大容量の水資源を確保するダムが、下流河川環境および水資源環境に与える影響は計りしれない。一般に、下流河川には維持流量として一定流量の水が放流されるが、それ以外にダムからの浸透水が河川に加わる。したがって、その起源となるダム周辺の浸透水の長期的な挙動を把握することは、河川環境維持のためにも重要である。

ダムにおける地下水関係の調査項目としては、間隙水圧、地下水位、漏水量、揚圧力等が一般的であり、

* 正会員 工修 ㈱間組技術研究所技術研究部主任研究員 (〒305 つくば市荻間字西向515-1)

** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

*** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

**** 工修 ㈱間組技術研究所技術開発部主任研究員 (〒305 つくば市荻間字西向 515-1)

これらの項目を監視することにより、ダム の安全管理が行われる。しかし、近年上記の調査項目に加えて、貯水池を起源とする浸透水の挙動を把握するために、天然地下水に含まれる物質の濃度を調査し、地下水に関する量的な情報だけでなく質的な情報を含めて地下水流動の変化を調査することが試みられている¹⁾²⁾。

本論文は、近年建設されたダム のうち、地下水関係の計測データだけでなく、周辺地下水の水質データが調査された数少ないダム のデータを整理し、それらのデータの長期的な変化から示されるダム 周辺の浸透水の挙動について考察したものである。

2. 調査対象地点

本論で取り扱うダム は、1980 年代に揚水式発電所の上ダムとして建設されたAダムである。ダム の諸元を表-1に示し、ダム 標準断面図を図-1に示す。Aダム の建設工事は1978年3月に着手され、1987年6月に初期湛水を開始し、1987年12月に満水位を迎えている。営業運転は、1988年4月から開始され、1991年6月より全機運転が開始された。

2.1 ダム周辺の地質

Aダム は、凝灰岩の分布域に位置しており、ダム 基礎の岩盤はすべて凝灰岩である。ダム 付近の地質断面図を図-2に示す。

ダム 基礎の河床および左岸は、押し出し堆積物と呼ばれる未固結の第四紀堆積物が凝灰岩を厚く覆っている。この堆積物は、河床で30~40mの厚さがあり、凝灰岩の角レキおよび同質の粘土、シルトからなり青灰色、あるいは、浸透水による酸化を示す茶灰色を呈している。基礎岩盤の凝灰岩は、粗粒で緑色のレンズ状パッチを含むものを主体とし、左岸の一部に砂岩質、シルト岩質のものを挟在する。河床には、ほぼ谷沿いに断層が存在し、この断層に付随する幅10m強の角レキ混じり粘土状の破碎帯が、上下流方向に延びている。河床の断層から左岸側の岩盤は、断層の影響で、圧砕を受け、ほぼ全域にわたって亀裂が発達し、風化が進行して、全般に劣化している。断層から右岸側の岩盤は、上部から中部の表層付近は風化が進み、レキ状を呈している。下部から河床にかけては、比較的堅硬な岩盤であるが、山側に傾斜する数条のシームがあり、その付近は細かい亀裂が発達している。亀裂は、ダム軸にほぼ平行し、垂直に近い傾斜のものが卓越して、一部開口している所もある。

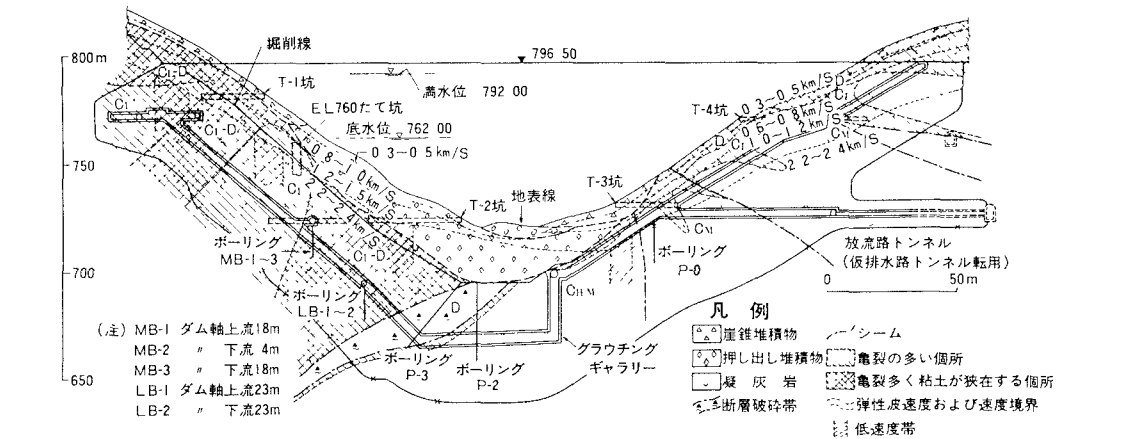


図-2 ダム地質断面図

表-1 Aダム の諸元

型 式	中央コア型ロックフィル
堤 高	102 m
堤頂長	340 m
堤体積	4,459,000 m ³
流域面積	3.7 km ²
H W L	EL.792 m
L W L	EL.762 m

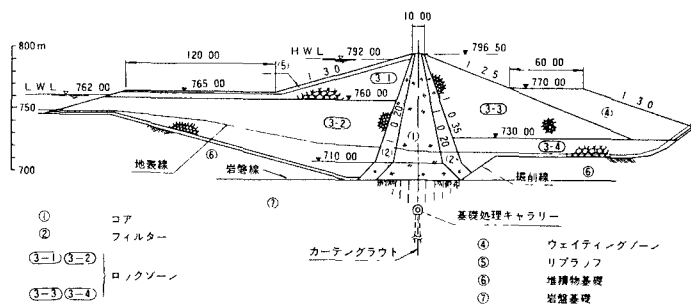


図-1 ダム標準断面図

2.2 基礎処理の概要

主要な基礎処理工を以下に示す。

- ①コア基礎部の押し出し堆積物の除去、
- ②コア基礎全面のブランケットグラウト、
- ③カーテングラウト(ダム軸沿いに3列、外側2列は標高に応じて15~25mとし、中央のカーテングラウトの深さは、最大60m。)、④ギャラリー周辺のコンソレーショングラウト、⑤ダム基礎に連なる右岸の尾根部約150m 区間におけるリムグラウト。

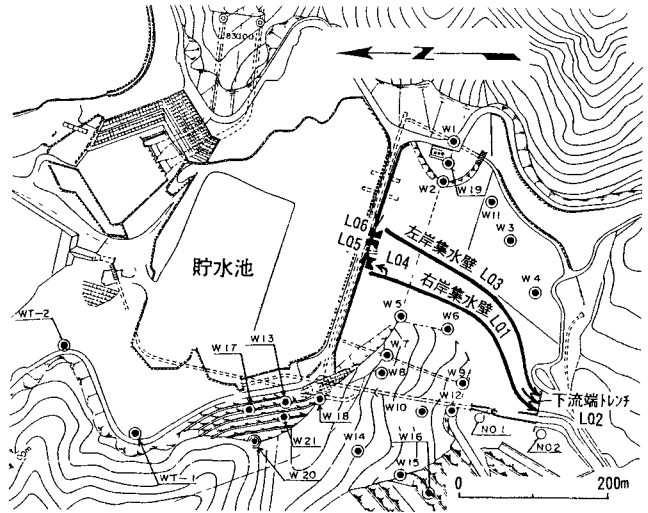


図-3 調査地点位置図

3. 調査項目

3.1 漏水量

Aダムにおける漏水量の観測はダム下

流側の漏水観測室で1時間毎に自動観測されている。漏水量は、LQ1~LQ6の6つに分割され、LQ1、LQ3はそれぞれ右岸側、左岸側の堤体内に設置された集水壁により集水された漏水量、LQ2は左岸側からの沢水を主体とする漏水量、LQ4は上段のギャラリートンネル内で集水された漏水量、LQ5、LQ6はそれぞれ下段のギャラリートンネルで集水された右岸側、左岸側からの漏水量である。

3.2 地下水の水質調査

水質調査は、図-3に示す貯水池、ダム周辺の地下水位観測用ボーリング孔、および漏水測定室において集水されたLQ1~LQ6の漏水を対象にし、初期湛水直前の1987年6月から開始された。調査頻度は、湛水開始当初は1~2週間間隔とし、徐々にその間隔を長くしていった。

分析項目は、pH、電気伝導度、水温、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- である。電気伝導度と水温は採水時に測定し、他はすべて室内にて測定した。 HCO_3^- 以外のイオン濃度はイオンクロマトグラフ(DIONEX, 2020i)を用いて測定し、 HCO_3^- の分析は上水試験法に従った。

4. 調査結果

4.1 地下水調査結果

降水量、気温、融雪量、積雪深、貯水位、漏水量および周辺地下水位の時間変化を図-4に示す。ここで、地下水位、漏水量は定時9時に測定された値を示し、融雪量および積雪深は、実測値ではなく、別途作成された融雪・積雪計算モデルによる計算値である³⁾。融雪・積雪計算モデルでは、降水量、日最高気温、日最低気温の実測データを用い、計算モデルの中で融雪基準温度、積雪基準温度の2つのパラメータを実測の積雪深を再現するように試行錯誤的に決定している。

(a) 漏水量の経年変化

本地点は積雪地帯であることから、図-4に示すLQ1、LQ2、LQ3の春先の漏水量の時間変化には、明らかに融雪による影響と見られる流量増加が認められる。また、これらの集水堰には降水や河川水も混入するために、降雨の影響によって漏水量が見かけ上増加する。

ダム基礎岩盤を通過してくる真の漏水量の増減を把握するには、降雨、融雪による影響を差し引いた基底流量とも言うべき流量の経年変化を観察する必要がある。この場合、降水、融雪による影響が全くない時期

表-2 年度毎の漏水量の最小値(単位 l/min)

	LQ1	LQ2	LQ3	LQ4	LQ5	LQ6
1988年度	8	313	10	124	11	67
1989年度	6	193	8	90	9	50
1990年度	4	95	2	58	9	43
1991年度	4	106	2	52	8	48
1992年度	2	41	3	43	10	41

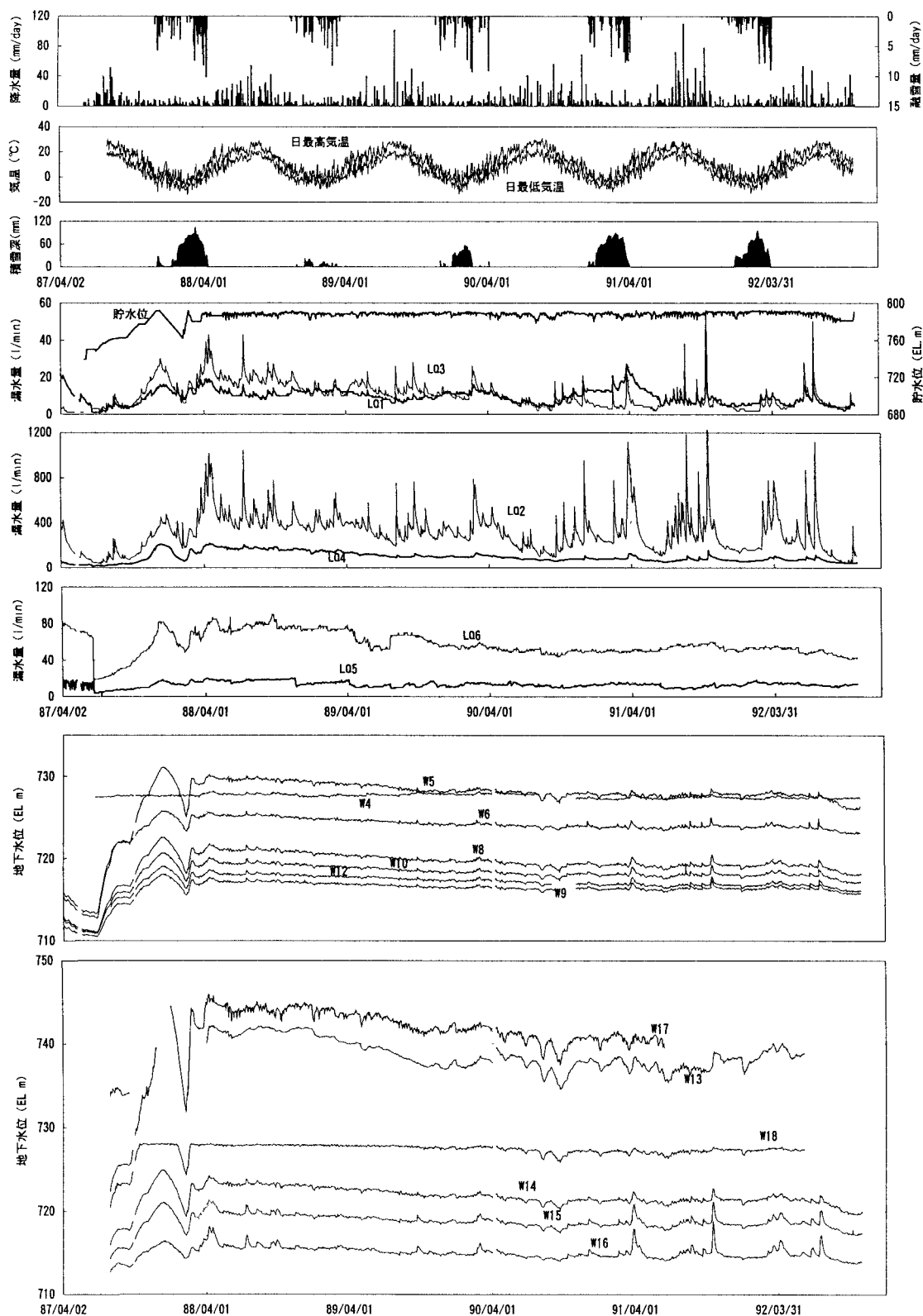


図-4 降水量、気温、融雪量、積雪深、貯水位、漏水量、地下水位の時間変化

における流量を真の漏水量とすべきであるが、現実的にはそのような条件下での計測データは得られていない。したがって、便宜的に試験湛水開始の翌年度の 1988 年度から 1992 年度まで、各年度毎の漏水量の最小値を採って表-2 に示した。表-2 より、漏水量は、絶対量が少ない LQ5 を除けばいずれも経年的に減少する傾向にあることが示される。特に、湛水開始当初、相対的に流量が多かった LQ2、LQ4 の漏水量の減少が著しい。これは、貯水池の底面あるいは集水堰に達するまでの基礎岩盤中での目詰まり現象によるものであろう。

(b) 地下水位の経年変化

漏水量の時間変化からは、ダムからの漏水量が経年的に減少していることが示されたが、漏水量のデータは最下流端での情報であり、貯水池から集水堰に至る浸透経路の状態を把握できない。このため、貯水池から下流に至る上下流方向の地下水位のデータを観察することが必要になる。

図-4 に示す地下水位のデータを見ると、W4を除いてはいずれのボーリング孔の地下水位も低下傾向にある。W4は湛水当初から貯水位の変動による影響も見られず、貯水池との連続性はほとんど無いと考えられる。W18は透水性の高いゾーンがEL.728m付近に存在するために、1989年以前はそれ以上水位が上昇しなかったが、1990年以降は他のボーリング孔とほぼ同様な水位低下傾向を示している。W13およびW17の水位は下流側のボーリング孔の水位よりも高い。これは、W13およびW17がリムグラウトより上流側に位置しているためである。しかし、その水位の低下傾向は下流側のボーリング孔より大きく、これらのボーリング孔より上流側の貯水池底面近傍で目詰まり現象が生じていると考えられる。

ここで、上記の目詰まり現象によるマクロな透水性の低下量を定量的に把握するために、図-5 に示すようなモデルを用い、上下流方向での透水性の変化量を透水量係数の変化量として捉える。

貯水池からの下流に至るゾーンを地下水位観測用のボーリング孔を境界として、図-5 に示すように3つに分割した時、ある時刻における単位幅あたりの流量は次式で示される。

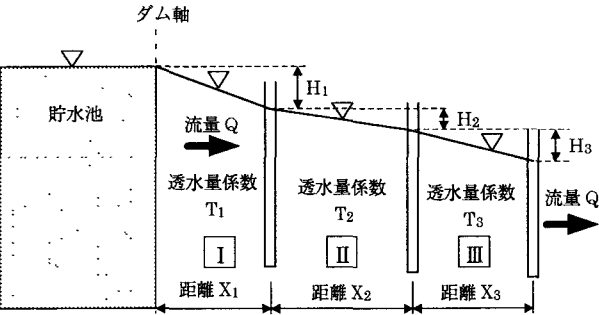


図-5 貯水池下流の水位低下量と透水量係数との関係

$$Q=T_1(H_1/X_1)=T_2(H_2/X_2)=T_3(H_3/X_3) \quad (1)$$

(1)式に定常状態におけるボーリング孔内の水位低下量とボーリング孔間の距離を代入することにより、ゾーンⅡあるいはゾーンⅢの透水量係数を基準にしたゾーンⅠの透水量係数の比 (T_1/T_2 、 T_1/T_3) が求められる。基準にするゾーンⅡあるいはゾーンⅢの透水量係数が時間的に変化しなければ、 T_1/T_2 、 T_1/T_3 の時間的な変化は、ゾーンⅠの透水量係数の時間変化を示すことになる。

表-3 透水量係数の時間変化

	H1(m) (貯水池-W14)	H2(m) (W14-W15)	H3(m) (W15-W16)	透水量係数の比	
				T_1/T_2	T_1/T_3
1988 年度	65.48	3.37	3.82	0.103	0.165
1989 年度	66.36	3.12	3.83	0.094	0.164
1990 年度	67.79	2.77	3.33	0.082	0.139
1991 年度	67.35	2.84	3.66	0.084	0.154
1992 年度	68.28	2.46	3.44	0.072	0.143

上記モデルを貯水池-W14-W15-W

16を結ぶ断面($X_1=136\text{m}$, $X_2=68\text{m}$, $X_3=48\text{m}$)に適用した結果を表-3 に示す。この計算では、降雨の影響が無い時期の地下水位のデータを抽出するために、1988年度から1992年度まで各年度毎の地下水位

の最小値を用い、貯水位は1988年度から1992年度までの平均貯水位(EL.789.9m)とした。

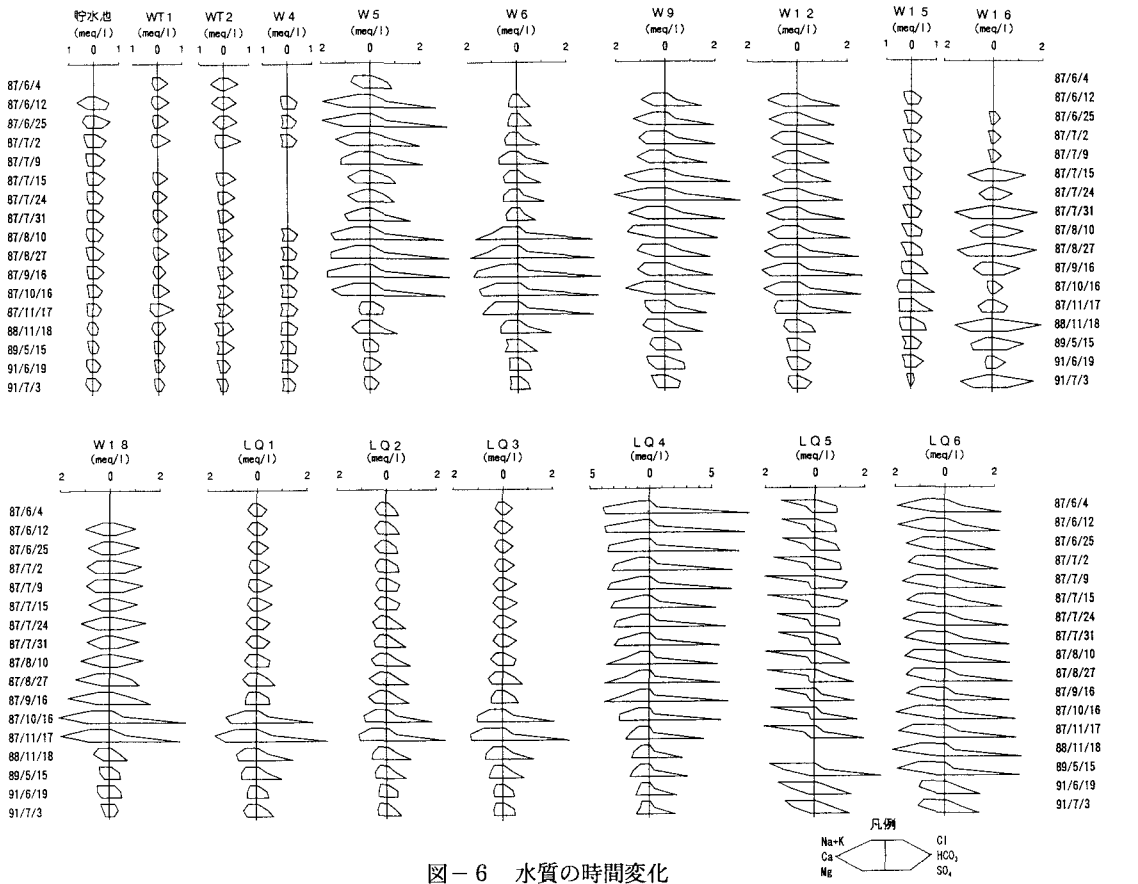
この結果、貯水池-W14-W15-W16を結ぶ断面において、ゾーンⅡを基準にすれば最上流側のゾーンⅠの透水量係数はゾーンⅡの透水量係数の7~10%、ゾーンⅢを基準にすればゾーンⅠの透水量係数はゾーンⅢの透水量係数の14~17%となり、いずれも最上流側の透水性が小さくなる。さらに、いずれの場合でもゾーンⅠにおける透水性は年毎に減少している。したがって、ダム建設時に構築された遮水ゾーン(カーテ

ングラウト、リムグラウト)は健全な状態で機能しており、貯水池水に含まれる細粒分によって岩盤の亀裂が経年的に目詰まりすることにより貯水池近傍で自然の遮水ゾーンが形成されつつあると言える。

4.2 水質調査結果

通常測定される地下水位、間隙水圧等の量的なデータと、地下水のイオン濃度等の質的なデータとの差は、前者が実際の水の移動が無くても圧力伝播だけで変化するのに対し、後者は実際に水の移動が無ければ変化しない点であろう。したがって、ダム湛水時の調査において水質データを併用した調査を行うことにより、従来の量的なデータだけを用いた調査より、現象をより正確に把握できると言える。

調査の結果得られたイオン濃度の時間変化をヘキサダイアグラムで示したものを、図-6に示す。



(a) 水質の特徴

図-6に示されるように、本地点では、高濃度の硫酸イオンを含む地下水が多く見受けられる。この高濃度の硫酸イオンと対になる陽イオンは、カルシウムイオン、マグネシウムイオンである。

堆積性の軟岩である泥岩地帯では、地下水中の硫酸イオン濃度が高くなることは、過去の調査事例や室内実験により明らかにされている⁴⁾⁵⁾。千木良ら⁶⁾⁷⁾は、綿密な室内実験と現地の風化帯調査を通じ、この硫酸イオンの発生メカニズムを、浅部の酸化帯における黄鉄鉱の酸化であることを明らかにし、このとき同時に生成した水素イオンが他の鉱物を溶解することを示している。



本地点の凝灰岩は、泥岩と同じく堆積性の軟岩であり、上記と同様なメカニズムにより高濃度の硫酸イオンが地下水中に供給され、同時に生成した水素イオンが鉱物を溶解した結果、高濃度のカルシウムイオン、マグネシウムイオンが地下水中に供給されているものと考えられる。

(b) 水質の時間変化から推定される地下水流動

図-6のヘキサダイアグラムより、貯水池の水質は1987年6月の湛水開始直後からほとんど低濃度のまま変化しないことが示される。

WT1、WT2のボーリング孔は、貯水池上流側の湛水面近傍に位置するボーリング孔であり、その水位は、貯水池水位と数cm程度の差しかない。水質も類似していることから、貯水池水との連続性の非常に高い地下水と言える。

① LQ1、LQ2、LQ3

LQ1、LQ3の漏水観測堰に流入する浸透水の水質は、1987年9月まで、微少ではあるが、硫酸イオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン濃度が増加した後、1987年10月から11月にかけてそれらの濃度が倍以上に増加し、その後1988年から1991年にかけて低下している。LQ2の濃度増加はLQ1、LQ3ほど急激ではないが、その変化傾向は類似している。

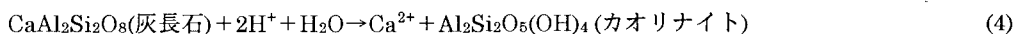
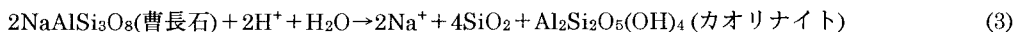
これらの漏水は、いずれも堤体内に設置された集水壁により集水された漏水であり、岩盤中に滞留していた高濃度のイオンを含む地下水が貯水池水により押し出されることによってイオン濃度が増加した後、貯水池水の到達によりイオン濃度が低下したものと考えられる。

図-4に示した漏水量の時間変化では、LQ2の流量はLQ1、LQ3の10倍以上となっているが、水質の変化から見ると、ダム下流側への到達時間に差はなく、流量の大小は集水領域の広さによるものと言える。漏水の到達速度は、量的なデータからは把握できず、水質データの利点は、このように実際の浸透水の到達時間を把握できる点にあり、このような水質データから示される貯水池水の到達速度を、設計値を使って計算される地下水の流動速度と比較し、ダム基礎岩盤の健全性を評価することも試みられている⁸⁾。

② LQ4；湛水前から本地点の水質の特徴である高濃度の硫酸イオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオンが検出されている。貯水池水の混入により濃度が徐々に低下しているが、湛水開始4年後の1991年においても貯水池水よりはかなりイオン濃度が高い。

LQ1、LQ2、LQ3、LQ4のpHは、5.5～6.5と弱酸性を示している。したがって、これらの地点に集水される地下水は、風化の進んだ表層付近の岩盤を通過するために、(2)式で示される反応から生成される水素イオンの影響を受けているものと考えられる。

③ LQ5；ナトリウムイオン濃度およびpHが9～10と高く、本地点では特異な地下水である。このような特徴を持つ地下水は、岩盤中での滞留時間の長い地下水に多い。深部岩盤中ではCO₂の供給が限られているために、(3)式、(4)式の反応によって地下水中の水素イオンが除去される⁹⁾。(3)式の反応が優勢な場合、地下水中のpHは高く、ナトリウムイオン濃度が高くなる。



本地点の基礎岩盤は、先に示したように左岸側の岩盤は風化が進行しているのに対し、右岸側深部は比較的堅硬な岩盤である。したがって、下段ギャラリートンネル内の右岸側で集水されるLQ5の漏水は、その水質と地質条件から透水性の低い岩盤内を長時間に渡って流動してきた地下水であると推定される。1987年8月頃からの重炭酸イオンの減少と硫酸イオンの増加、さらに、1988年から1989年の間におけるカルシウムイオン濃度の増加という変化が見られるが、その原因は不明である。

④ LQ6；湛水開始後約2年経過した1989年においてもイオン濃度の変化はほとんどなく、浸透速度が非常に遅いことが示される。pHは8～9とLQ5に次いで高く、滞留時間が長いことを示している。4年後の1991年においてイオン濃度の減少が観察され、この時期における貯水池水の到達が示唆される。LQ4とは異なり、マグネシウムイオン濃度が低く、その浸透経路が同一ではないことが示される。

⑤ W4（左岸）；地下水位のデータから、湛水による影響がほとんど無いことが示されている。水質データを見てもイオン濃度の変化はなく、左岸地山からの定常的な地下水流動の経路に位置する観測点である。

⑥ W5、W6；LQ1～LQ3と同じく、岩盤中に滞留していた高濃度のイオンを含む地下水が貯水池水により押し出されることによってイオン濃度が増加した後、貯水池水の到達によりイオン濃度が低下するという現象が観察される。貯水池水の到達は、W5では1987年11月頃あるいは1988年11月から1989年5月の間と考えられ、W6は1988年頃と推定される。

⑦ W9、W12；本地点の水質の特徴である高濃度の硫酸イオン濃度が低下する時期を貯水池水の到達時期と見れば、その到達時期はW9が1989年頃、W12が1988年頃であることが示される。地下水位は、図-4に示すように、W9の方がW12より低く、貯水池からW9に向かう経路の透水性がW12の経路より小さいことが示され、水質の時間変化から示される到達時間の差と符合する。

⑧ W15；イオン濃度が低く、その時間変化も小さい。1987年10月から11月にかけての濃度増加とその後の濃度低下が示される。1991年7月のデータは貯水池水よりもイオン濃度が低く、表流水の混入が示唆される。

⑨ W16；濃度の増減が著しい。この原因は明らかではないが、イオン濃度の低い雨水や表流水が一時的に流入している可能性がある。

⑩ W18；貯水池に最も近い観測孔であり、地下水の押し出しと貯水池水の到達時期が明瞭に示される。貯水池水の到達は1987年11月から1988年11月の間であろう。

5. まとめ

初期湛水時から水質調査を含む系統的な地下水調査が実施されている凝灰岩地帯に建設されたAダムを対象にし、地下水位、水質等の長期的な変化から示されるダム周辺の浸透水の挙動について考察した結果、以下の知見が得られた。

①本ダムにおける漏水量は、絶対量が少ないLQ5を除いてはいずれも経年的に減少する傾向にあり、特に、湛水開始当初、相対的に流量が多かったLQ2、LQ4の漏水量の減少が著しい。

②上下流方向での岩盤のマクロな透水性の差を透水量係数の比として示すことにより、ダム建設時に構築された遮水ゾーンが健全な状態で機能しており、さらにその時間変化から上流側における経年的な目詰まりにより貯水池近傍で自然の遮水ゾーンが形成されつつあることが示された。

③漏水の水質データにより、漏水観測堰に貯水池水が到達するには湛水開始後1年以上かかることが示された。

④ボーリング孔内で採取された地下水の水質データにより、貯水池水の到達は最も早い場所でも湛水開始後約5ヶ月後であり、その他のボーリング孔においては、1年以上後であることが示された。

以上、数年に渡って調査された地下水の水質データは、本ダムにおける浸透現象が、数ヶ月から数年単位での長期的な流動現象であることを明らかにし、地下水の量的なデータの評価と合わせて、本ダムの健全性は十分確保されていることが実証された。

参考文献

- 1) 塩崎功、向上祐美、水質・同位体を利用したダム周辺地下水流動調査、第5回ダム工学会研究発表会講演集、pp. 31-33、1994。
- 2) 鈴木英也、谷口博幸、川上康博、塩崎功：奥美濃川浦ダム・鞍部ダム・上大須ダム試験湛水時の地下水調査、土木学会年次学術講演会講演概要集VI、pp. 268-269、1995。
- 3) 合田勝男、窪田賢次郎、塩崎功、融雪量を考慮したパソコンによる漏水量の簡易予測・監視手法、電力土木、No. 236、pp. 70-79、1992。
- 4) 塩崎功、北村孝海、向上祐美：地下水の水質変化のメカニズムに関する研究-(その1)岩石試料を用いた溶出実験結果について-、間組研究年報、pp. 145-153、1989。
- 5) 佐川国隆、向上祐美、塩崎功：新水ヶ瀬ダム初期湛水時における水質調査、応用地質学会研究発表会論文集、pp. 185-188、1990。
- 6) 千木良雅弘、曾根賢二：泥岩の化学的風化のメカニズム-岩石劣化試験装置を用いた酸化実験-、電力中央研究所報告、U87040、1987。
- 7) 千木良雅弘：泥岩の化学的風化のメカニズム-自然環境下での風化と斜面安定-、電力中央研究所報告、U87041、1987。
- 8) 村上晃生、塩崎功、今井久：ダム初期湛水時のイオン濃度を利用した透水性の評価、土木学会年次学術講演会講演概要集VI、pp. 266-267、1995。
- 9) 一國雅巳、鈴木勸子、鶴見実：水-岩石相互作用の生成物としてのアルカリ性氫泉水、地球化学、Vol. 16、pp. 25-29、1982。