

# ダム建設にともなう骨材の問題

針 生 眞 也\*

## 1. ま え が き

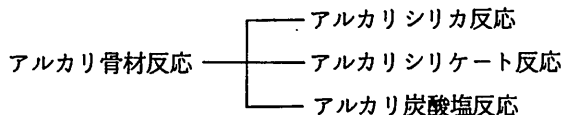
大ダム、特にコンクリートダムの建設では、コンクリート骨材の不足がかなり以前から問題となっている。近年では、さらに河川砂利が枯渇しその採取は行政指導により厳しく規制され、その結果として河川砂利の使用量は限られてきている。このため最近のダム建設では、原石山から骨材を採取することが多い。しかし、施工中もしくは計画中のダムで良質の骨材の賦存量が足りないという情報が多く聞かれる。この理由としては、ダムサイトを計画するうえで、良好な岩盤の分布する場所が少なくなったことの延長線上に問題点があると云ってよい。良好な原石山とは一言で云うと、品質の良い骨材の生産歩留りが良いという事である。品質の良い骨材とは、これまでは新鮮で十分な強度を持ち粒形・粒度が適当であるものとされてきたが、原石山が、良好な岩石の分布域からの選定が困難な現状では、多少品質が低下した岩石でも使用せざるをえないのが現状である。このため低品質ながらもより品質の良い岩石を求めため、近年では、コンクリートに対して有害な鉱物を含まないことも重要な岩石選定の要素となっている。そこでここでは、コンクリートに対して有害な鉱物についてまとめ、さらにアルカリ骨材反応およびローモンタイト反応について述べる。

## 2. コンクリートに有害な鉱物

コンクリートに有害な鉱物は、コンクリート標準示方書〔施工編〕（1986）、ダムの地質調査（1986）および多目的ダムの建設（1987）などによると、シリカ鉱物、玻璃（ガラス）、モンモリロナイトおよびローモンタイト等の鉱物があげられている。このうち、シリカ鉱物と玻璃はアルカリ骨材反応（厳密にはアルカリシリカ反応）を起す。一方、モンモリロナイトおよびローモンタイトは、体積変化を起す鉱物であり、それに起因してコンクリートが劣化するとされている。表 2.1 に有害鉱物の代表例をまとめて示した。

## 3. アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応は、次のように区別される。



現在我が国で問題となっているのはアルカリシリカ反応によるもので残る 2 つの反応については実害は今だ報告されていない。

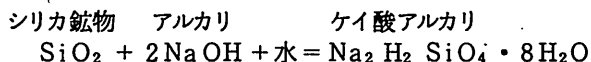
\* 応用地質株式会社新潟支店

表 2.1 有害鉱物の代表例

鉱物名	産状	コンクリートへの弊害	骨材としての使用上の注意
モンモリロナイト	熱水変質作用、続成作用、風化などを受けた火山岩類や堆積岩中の構成鉱物を交代して存在。熱水変質作用を受けた岩石では、岩石の種類を選ばず岩石の割れ目を充填して細脈として存在。	乾湿くり返しや凍結融解に伴って、骨材中に含まれるモンモリロナイトが膨張・収縮して体積変化をおこしコンクリートに割れ目を生じさせる。	モンモリロナイトを重量比で20%以上含む骨材を使用すると、スケーリングやポップアウトを生じた事例がある。20%以下であると上述した弊害はないとの報告がある。細脈状で分布するモンモリロナイトは、骨材の製造破砕過程で水洗いをするると除去されるケースが多い。
ローモンタイト	熱水変質作用による変質鉱物を交代して存在。あるいは、岩石中の割れ目を充填して存在。	コンクリートの表面剥離、強度低下、ポップアウト。ローモンタイトは、乾湿くり返しで体積変化を起こし骨材が劣化してコンクリートを劣化させる。	過去の事例だと含有量重量比が0.5～0.6%以下であれば劣化しないという結果が知られている。
玻璃(ガラス)	火山岩や堆積岩に普通に存在する。	シリカ鉱物と同様にセメント中のアルカリと反応し、玻璃粒子が膨張し、その結果コンクリートが膨張して劣化する。	問題を起こしたコンクリートの分析では、骨材中の玻璃の量は20%以上。
アルカリゼオライト ・輝沸石 (ヒューランダイト) ・ソーダ沸石 (ナトロライト)	熱水変質作用による変質鉱物で火山岩の空洞中に産出する。	骨材中にアルカリゼオライトが存在するとアルカリゼオライト中のNaがセメント中のCaとイオン交換してセメント中Na量が増加する。骨材中に反応性シリカが存在すると、アルカリと反応してコンクリートは膨張し、キレツが発生する。	我が国では、問題となった事例報告はない。
シリカ鉱物 ・オパール ・玉髄 ・クリストバライト ・トリディマイト	(オパール) 温泉変質を受けた火山岩や、その空隙を満たして産出。堆積岩中では、膠結物として存在。(玉髄・クリストバライト・トリディマイト) 温泉変質を受けた火山岩及び火山砕屑岩中に存在。	セメント中のアルカリと反応しやすい所謂アルカリシリカ反応を起こす。この反応はシリカ鉱物の化学的・物理的安定性が低いものほど容易に起こり、シリカ鉱物の表面積、温度及びアルカリ濃度が高いほど増大する。コンクリートが膨張し、ポップアウトやキレツが発生する。	過去の事例だと、コンクリートに害を及ぼすシリカ鉱物量は重量比で20%以上という報告がある。

この反応が我が国に紹介されたのは1960年代初頭であった。当初はほとんど無視されていたが、阪神地区でコンクリートの劣化現象が現われて、その原因がアルカリシリカ反応と確認されて以来、注目されるようになった。アルカリシリカ反応は近年では、セメント化学専門委員会(1974)、有泉(1979)などの研究があるので、その詳細はそれらを参考にされたい。

アルカリシリカ反応は、次の反応式で示されるように基本的にはセメント中のアルカリ( $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ )と骨材中のシリカ( $\text{SiO}_2$ )との反応であり、骨材の表面などにケイ酸アルカリ(水ガラス)ゲルが生成する。



また、この反応によるコンクリートの割れ目の発生原因は、生成されたケイ酸アルカリ(水ガラス)ゲルが吸水して膨張する際に発生する膨張圧がモルタルに作用する結果によるとされているのが一般的見解である。

### 3.1 竣工後の実害例

Aダムは、ダム高110mのアーチダムであり、図3.1に示すように、堤体下流側左右部およびダム堤体下部に著しいヘアクラックおよびポップアウトが発生し、1982年から原因調査が開始された。Aダムのコンクリート骨材は、新第三紀の流紋岩であった。当時は十分な情報がなく、文献や土木研究所などの協力を得て、骨材が流紋岩ということから原因はどうやらアルカリシリカ反応らしいと推定するに至った。その推定を実証するため、ASTMに基づいた試験を行った。その結果、モルタルバー試験ではシリカ鉱物量が重量比で20%以上の骨材を使用すると劣化することを確認した。このため、ダム堤体をコアボーリングして、コンクリート中の骨材を化学分析した結果、骨材の5割以上においてシリカ鉱物量が20%以上であり、アルカリシリカ反応が初生原因と判断するに至った。

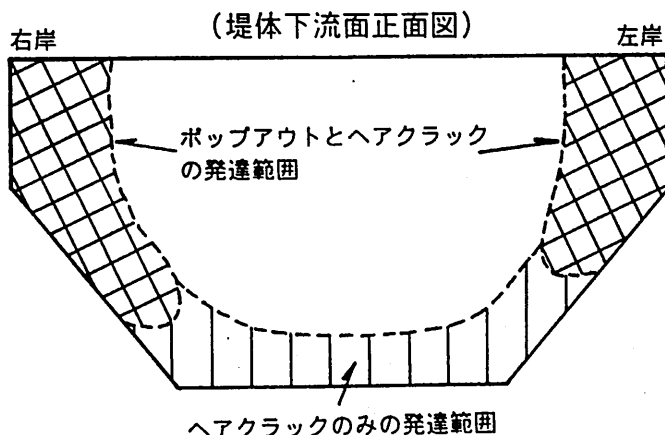


図3.1 Aダムの劣化概要図

### 3.2 アルカリシリカ反応の調査法

現在では、この反応は市民権を得たかたちとなっており、調査方法もほぼ確立されつつある。その代表的方法を次に示す。

#### ① 第1段階

アルカリ骨材反応を起すとされている岩石を骨材として使用する場合は、事前に顕微鏡観察やX線回折を行ってシリカ鉱物の量比の概要を把握する。

#### ② 第2段階

第1段階の調査でシリカ鉱物が多いことが把握された場合には、ASTMに従った試験を行うことが望ましい。

##### (その1)

ASTM. C.289 (化学法)に従い実際に反応性を検査する。

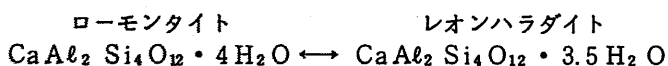
##### (その2)

化学法で反応が出た場合は、ASTM. C.227 (モルタルバー法)で潜在性膨張性アルカリ反応を検査する。

## 4. ローモンタイト反応

ローモンタイトが原因でコンクリートが劣化することは、Hansen (1963), (1968), PEA (1923), 有泉 (1979), 針生・吉田 (1981) の報告がある。我が国では、4ヶ所のダム原石山でローモンタイトが確認され、その内2ヶ所の原石山ではローモンタイトを排除できないことが確認され、原石山を変更するに至っている。また栃木県のBダムのように、骨材生産時にローモンタイトが発見され、2次プラントにホッパーを設け、無作為に骨材を抽出しX線回折を行い品質管理しつつ使用した例もある。

ローモンタイト反応によるコンクリートの劣化機構については、一般的な説明によるとローモンタイトは大気中に暴露するか軽く熱すると1/8の沸石水を失いレオンハラダイトに変わり1.5%の体積が圧縮される。その化学反応式は次式で示される。



この反応は可逆的で、コンクリートが乾湿くり返しを受けるとローモンタイトの体積変化から骨材の体積変化が起り、コンクリートが劣化するとされている。しかし丸 (1981) によるとローモンタイトは水の存在下でセメント中のCaと反応しゾルを生成させ、この化学反応がセメントの結合力を低下させコンクリートを劣化させるという見解もある。

### 4.1 竣工後および計画時での実害例

我が国のダムでの実害例は、九州のCダムのみ知られている。骨材は、新第三紀凝灰質砂岩であった。Cダムでは、竣工4年目頃から顕著な実害が観察されるようになった。堤体表面に細かいクラックが入り、やがて堤体の角の部分は砂状になり表面のコンクリートが崩れ落ち、粗骨材がむき出しとなった。

四国のDダムおよび神奈川県のエダムは原石山調査中にローモンタイトが確認された。岩石はDダムが中生層の砂岩、Eダムが新第三紀の凝灰質砂岩であった。ローモンタイトの産状は、両ダムとも細脈として存在し、岩石からの排除が困難とされた (Photo 1, 2)。



Photo. 1 凝灰質砂岩中に発達する白色脈  
写真中のやや太い白色脈はカルサイト vein。  
ローモンタイトは白色細脈として発達。



Photo. 2 砂岩中に発達する白色細脈  
この砂岩では、岩石中にもローモンタイト  
が含有していた。

Eダムでは、モルタルバーを作成して原石山の山中で自然暴露試験を行った。その結果、ローモンタイトが重量比で5%以上含まれる骨材を使用したものは、1年目で角が丸味をおび、2年目で細片した (Photo. 3, 4)。この結果も加味されてEダムでは、原占山を捨て、ダムサイトの掘削ズリと河川砂利を購入することにより必要量を補った。

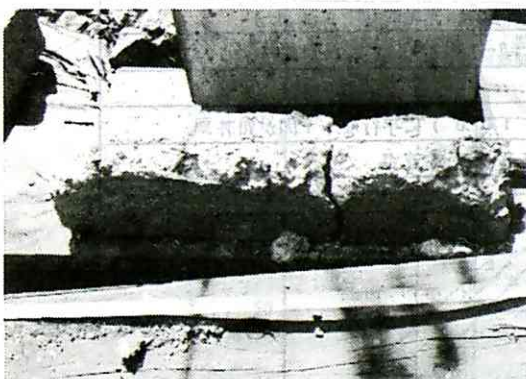


Photo. 3

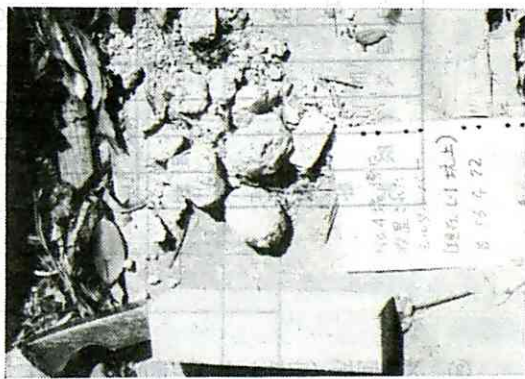


Photo. 4

Photo. 3・Photo. 4 ローモンタイトを含有している骨材を使ったモルタルバーの自然暴露試験。(ローモンタイトは骨材中に重量比で0.5%以上含まれている)  
Photo. 3は自然暴露して1年目。Photo. 4は2年目。

#### 4.2 ローモンタイトの調査法

定性的手段としては、顕微鏡観察とX線回折が良い。

##### ① 顕微鏡観察

岩石顕微鏡を用いて観察する場合、バルサムより明らかに低い屈折率と淡灰色の低い干渉色は沸石の共通する特徴であり、注意が必要である。短柱状の結晶、ヘキ開の発達、斜消光および正の伸長性などはローモンタイトが他の沸石類と異なる特徴である。従って大きな結晶は検鏡で同定可能である。ここで、都城・久城 (1976)、WINCHELL (1961) を参考にして光学的特性を次に示す (Photo. 5, 6 に顕微

鏡写真を示す)。

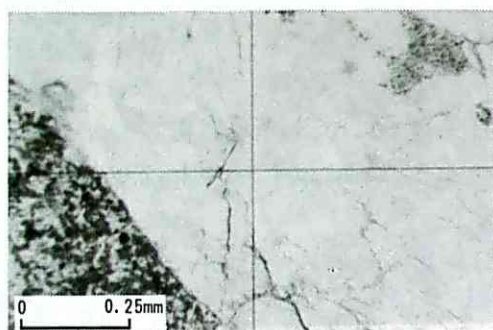


Photo. 5 (下方ポーラーだけ)

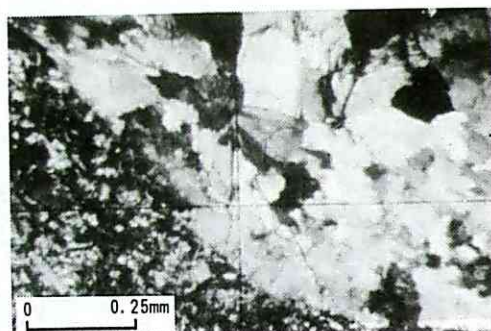


Photo. 6 (直交ポーラー)

Photo. 5・Photo. 6 ローモンタイトの顕微鏡写真

表 4.1 ローモンタイトの光学的特性

項 目	記 事
薄片での色	無色
光学性および光軸角	二軸(-) $2V=26^{\circ}\sim 47^{\circ}$
光学的方位	$Y=b$ $Z\wedge C=20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 光軸面 $\parallel(010)$
屈折角	$\alpha=1.502\sim 1.513$ , $\beta=1.514\sim 1.524$ , $\gamma=1.516\sim 1.526$
バイレフリゼンス	0.011~0.016
へキ関	(010)と(110)に平行なへキ関が顕著
双晶	(100)を双晶とする双晶
光学的伸長性	正

## ② X線回折(定性および定量)

図 4.1 に純粋ローモンタイト 100% の X 線回折結果を示す。ローモンタイトの最強ピークは、図中(A)の  $9.3^{\circ}$  にある。しかし同じ沸石類のスチルバイトは  $9.5^{\circ}$  に、葡萄石は  $9.4^{\circ}\sim 9.6^{\circ}$  に最強ピークがくる。これらの鉱物は、ローモンタイトに伴って産出することが多いので注意する必要がある。このため、ローモンタイトの判定では、確実なのは 3 番目のピークである(C)の  $12.9^{\circ}$  に注目する必要がある。この付近のピークは他の鉱物には少ないので指標となりえる。

図 4.2 には E ダムで作成した検量線の例を示した。X 線回折は、本来定性的な分析方法であるが、含有量の明らかな試料とピークの高さを比較し、それに基づいた回折ピークの高さから含有量を判定することができ、定量的判定が可能となる。図 4.2 の検量線は、ローモンタイトを含まない岩石を粉碎して母岩とし、ローモンタイトの量比をかえた試料を作成して X 線回折を行い最強ピークの高さとローモンタイト含有量との関係をまとめたものである。ただし、この検量線は E ダムのみしか使用できないので、各々の調査で作成する必要がある。

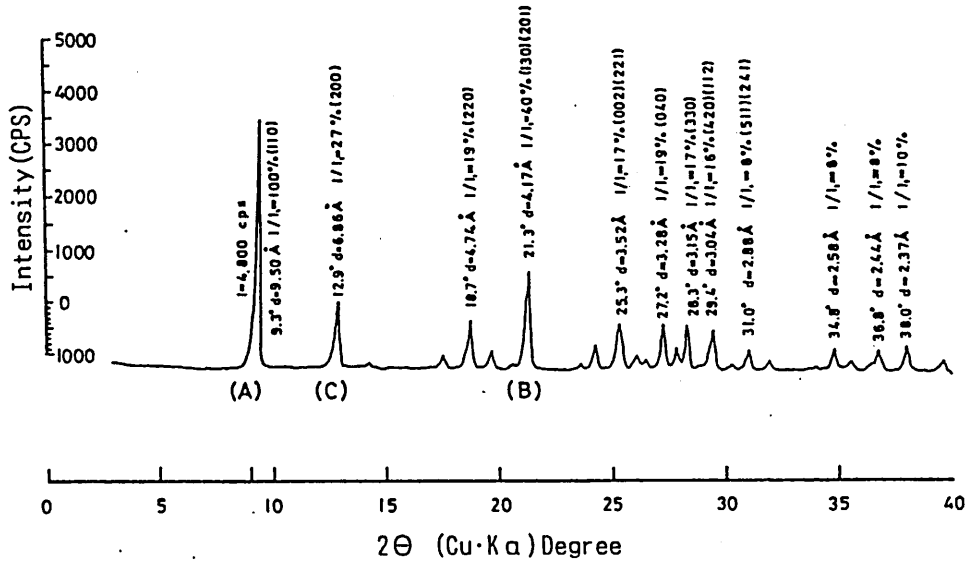


図 4.1 ローモンタイト 100% の試料による X 線回折結果

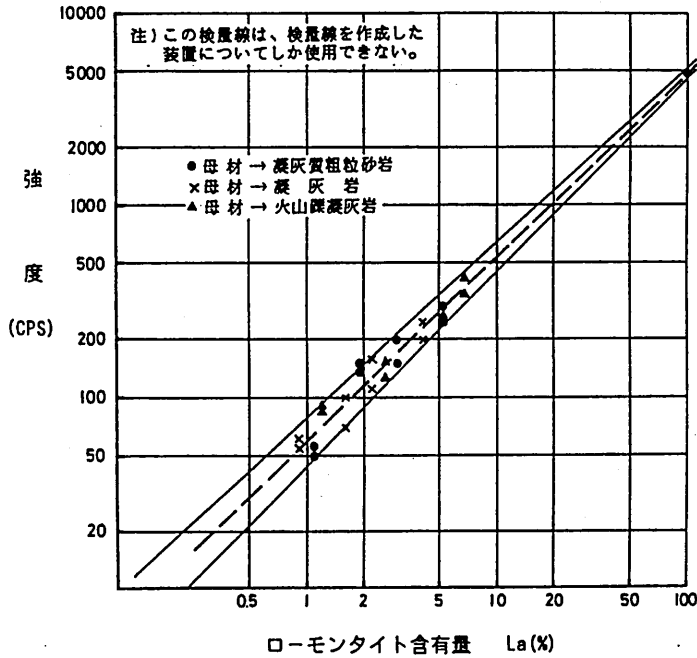


図 4.2 ローモンタイト含有量の検量線

## 5. コンクリート劣化防止方法

アルカリ骨材反応や、ローモンタイト反応によるコンクリートの劣化は、両者とも初生的原因である。それらの反応によって発生したヘアクラックやポップアウトが乾湿くり返しおよび凍結融解により劣化が拡大し、より著しい劣化に発展すると考えるのが妥当であろう。

Aダムで行った堤体コンクリートの凍結融解の追跡調査では、堤体表面から深度30cmまでは、季節的温度変化があり、コアリング調査でもクラックの到達深度は30cm程度までであった。即ち、その深度程度までは凍結融解の影響範囲であるとの結果に至っている。

両反応は、コンクリート表面からごく浅所部で起ることが確認されており、反応によるヘアクラック等の発生に凍結融解などが加わって劣化が促進されるものの、Aダムの事例などから劣化深度は浅所で終息すると判断してよさそうである。ただし地域性の考慮は必要であろう。

この様な劣化機構を防止する方法としては、現状では次の方法が考えられている。

- ・堤体表面に塗料を塗って乾湿くり返しを防ぐ（Aダムで実験中）。
- ・配合セメント量を増しコンクリートの強度増加を計る（ローモントイト反応のみ対応）。
- ・堤体表面付近のみ川砂利を使ったコンクリートを打設する（Bダムで実施）。
- ・高シリカセメントの使用（一部に疑問視する研究者もいる）。

## 6. あとがき

新潟県は、グリーンタフが広く分布し、グリーンタフ地向斜に伴う熱水変質作用は広く確認されている。この様な地域でダム建設に伴う原石山の選定の際には、少なからずコンクリートに有害な鉱物が含まれていると考え、事前調査段階でそれを考慮しておく必要がある。また有害鉱物に対する調査は、ダム建設を円滑に進めていく上で重要な要素となりつつある。

ここで述べた両反応は、コンクリートを劣化させるという点では同一視できるが、その反応機構はまったく異っており取り扱いに注意する必要がある。

なお、本報文はあくまで概要的意味合が強く、十分説明しつくしていない点および著者の勉強不足の点などが多々あり必要十分ではないことをお許し願いたい。この報文作成に際しては、応用地質学会の安藤 廉氏、村山一雄氏の御助言をいただいた。紙面を借りて深謝の意を表す次第である。

## 引用文献

- ・有泉 晶 (1979) ; コンクリート用骨材の問題点, 粘土科学, Vol.19, No 2, P41-55.
- ・土木学会 (1986) ; コンクリート標準示方書〔施工編〕, P 20-30.
- ・土木学会 (1986) ; ダムの地質調査, P 153-170.
- ・セメント化学専門委員会 (1984) ; アルカリ骨材反応に関する文献調査, (社)セメント協会, P 20-27.
- ・渋谷長美 他 (1985) ; アルカリ骨材反応に関する研究 (1), 鹿島建設技研年報, Vol.33, P 43-48.
- ・ダム技術センター (1987) ; 多目的ダムの建設 (調査編), P 262-263.
- ・HANSEN.W.C (1968) ; ASTM Special Technical publication, No 169-A, P 487-496.
- ・HANSEN.W.C (1963) ; Highway Research Record, No43, P 1-6.
- ・針生眞也, 吉田堯史 (1981) ; 骨材におけるローモントイト問題について, 応用地質学会, 内部資料, Vol.18, P 1-10.
- ・都城秋穂, 久城育夫 (1976) ; 岩石学 I, 共立全書, P 132-133.
- ・丸 章夫 (1981) ; 鉱物学的立場から見た骨材の品質, セメントコンクリート, No 415, P 129-134.
- ・PEA.J.C etc (1923) ; An Interesting Case of Dangereaus Aggregate, Proc, Amer, Conc, Inst Vol.19, P 142-153.
- ・WINCHELL, A, N (1961) ; Elements of Optical Mineralogy, NY, JOHN WIEY and SONS, INC, LONDON, P 342-343.