

IV-1 濁沸石等含有岩石のダムコンクリート骨材としての有効利用に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平12～平15

担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人，阿南修司，伊藤政美

【要旨】

濁沸石を含む原石の有効利用を行う事を目的として、モルタルの曝露試験および曝露によって劣化したモルタルの形態・化学分析，ならびに濁沸石の吸水による膨張圧の測定を行った。その結果，濁沸石周辺に異常膨張を起すような物質や水和物は認められず，濁沸石を吸水，乾燥させると繰り返し膨張圧が生じることが明らかとなった。このことから，濁沸石によるコンクリートの品質低下は，濁沸石結晶の乾湿繰り返しに伴う膨張圧による疲労破壊に起因し，濁沸石を含む骨材の利用は乾湿の変化の乏しい条件であれば問題を生じないと考えられる。
キーワード：コンクリート骨材，濁沸石，乾燥湿潤繰り返し，膨張圧，疲労破壊

1. はじめに

ダム用コンクリート骨材の原石山の環境保全や資源の有効利用の観点から，原石の廃棄量を抑えることが望まれている。

濁沸石がコンクリートにとって好ましくないことは，1923年にPearson & Loughlin¹⁾によって初めて報告された。その後，1969年にASTM C 294²⁾で，濁沸石は乾燥湿潤に伴う体積変化があり，要注意であることが記載された。我が国では，1979年に有泉³⁾がPearson & Loughlin¹⁾の報告を引用するとともに，濁沸石を膠結物として含んだ砂岩によるコンクリートの劣化の事例を紹介し，劣化の原因は濁沸石とレオンハルタイトの転移時体積変化であると推定している。その後，同様な報告が複数なされているが，一般的な環境下での濁沸石によるコンクリートの品質低下機構は実証されていなかった。

本研究では，濁沸石によるコンクリートの品質低下機構に基づいた劣化の抑制手法を提案し，従来廃棄対象となっていた原石の有効利用を行う事を目的として，モルタルの曝露試験および曝露によって劣化したモルタルの形態・化学分析，ならびに濁沸石の吸水による膨張圧の測定を行った。

2. 研究方法

2.1 曝露試験

実験には濁沸石含有骨材（L）として脈状または斜長石を置換した濁沸石を含有する熊本県産の閃緑岩，濁沸石非含有骨材（S）として広島県産の花崗岩を使用した。これらの岩石を5mm以下

に粉碎し，表-1に示す割合で混合した。なお，表-1にはあげていないL0骨材はS骨材とは混合せず，純粋なL骨材のみで構成されており，濁沸石含有量は30%である。

上記の調製骨材と普通ポルトランドセメントを用いて，W/C=0.5，S/C=2.0でモルタル供試体を作製し，土木研究所構内にて曝露した。曝露は降雨がモルタルに当たる条件（降雨条件）と当たらない条件（非降雨条件）に分けておこなった。このとき，曝露期間中の任意の材令において質量，共鳴振動数，長さの測定を行った。また，粒度調製をしていないL骨材を使用してコンクリート供試体を作製し，同じく曝露した。

2.2 偏光顕微鏡による形態観察

曝露試験に用いたモルタルおよびコンクリート供試体の劣化状況を偏光顕微鏡にて観察した。

2.3 電子顕微鏡による形態観察および元素分析

曝露試験に用いたモルタルおよびコンクリート供試

表-1 骨材の調整粒径と割合（表中の単位はWt%）

調製骨材名		粒径(mm)						濁沸石含有量
		5-2.5	2.5-1.2	1.2-0.6	0.6-0.3	0.3-0.15	<0.15	
L1	L	15.94	35.68	-	-	-	-	10
	S	-	-	16.48	16.48	10.03	5.39	
L2	L	-	-	26.55	34.48	-	-	8.5
	S	6.86	16.6	-	-	10.1	5.41	
L3	L	-	-	-	57.69	-	-	10
	S	5.22	12.64	12.64	-	7.69	4.12	
L4	L	-	-	-	42.87	19.24	-	10.8
	S	5.71	13.83	13.83	-	-	4.52	
L5	L	-	-	-	-	-	12.55	3.4
	S	9.01	21.82	21.82	21.82	13.28	-	

体について、走査型電子顕微鏡 (SEM) により形態観察と SEM 付属のエネルギー分散型分析装置 (EDS) により元素分析を行った。

2.4 X線回折による劣化部の生成物の分析

曝露試験に用いたモルタルの劣化部の生成物を X線回折試験によって分析した。

2.5 濁沸石結晶の膨張圧の測定

濁沸石の単結晶を用い、結晶の乾燥湿潤で発生する膨張圧の変化を測定した。試験に用いたのはインド産の濁沸石の c 軸方向に伸長した単結晶で、玄武岩の晶洞に生成したものである。試料は結晶を c 軸に平行な劈開面で約 3mm 角にはぎ取り、長さ 15mm 程度に成形した。結晶の劣化を防止するため、試験前の試料は水中で保管した。なお、濁沸石と同じ沸石族鉱物に属する束沸石、スコレス沸石、ソーダ沸石ならびに方解石も測定に供した。

膨張圧は図-1のように、載荷板で試料と荷重計を挟み、上からねじで締め付けて初期拘束圧を与え、荷重の変化を測定した。膨張圧は、荷重を載荷板と試料の接触面積で除して求めた。なお、試料は天地の一軸方向のみ拘束されており、周囲は拘束されていない。

試験条件は表-2に示すように、湿潤と乾燥を繰り返すケースと湿潤のみのケース、水で湿潤させるケースと水酸化カルシウムおよびセメント細孔溶液で湿潤させるケースの合計6ケースで行った。なお、セメント細孔溶液は、普通ポルトランドセメントを W/C=0.5 で練り混ぜ、24 時間放置した後、加圧抽出したものを用いた。いずれの試験でも、試験開始前に試料を水中から取り出し、12 時間気乾させた。湿潤は、初期拘束

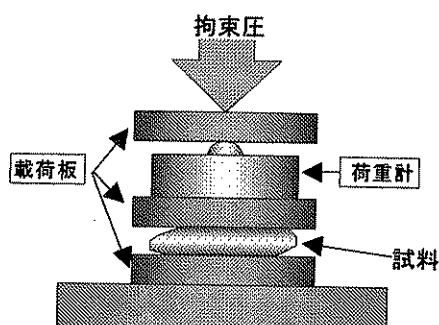


図-1 膨張圧の測定方法

表-2 膨張圧の試験条件

試験ケース	条件	溶液	初期圧	試料初期状態
1	乾湿	水	0.23	気乾
2	乾湿	水	0.27	気乾
3	乾湿	水	0.14	気乾
4	湿潤	水	0.26	気乾

初期圧の単位：N/mm²

圧を与えた試料に、水あるいは溶液を直接滴下して行った。乾燥は、試料に付着した水滴を保湿紙で拭き取った後、室温で送風して行った。

3. 研究結果

3.1 曝露による劣化^{4),5)}

降雨条件下にある L0 モルタルでは、曝露開始後 50 日位から、モルタル表面の劣化が認められるようになった。劣化は亀裂、剥離、ポップアウトとして現れている。他方、非降雨条件下にある L0 モルタルでは、材令 1,500 日においても劣化は認められなかった。

図-2 は曝露による相対動弾性係数の経時変化を示したものである。降雨条件下の L0 モルタルでは、既述のように相対動弾性係数は急速に低下し、材令 500 日以前にモルタルは崩壊し、測定不可能になっている。一方、非降雨条件下の L0 モルタルでは、材令 1,000~1,500 日位までは相対動弾性係数は、80%以上であるが、その後、徐々に低下している。L1~L5 モルタルでは、降雨条件下での相対動弾性係数の低下が若干認められ、他方、非降雨条件下では全く変化が認められない。このように劣化の程度は、降雨条件と非降雨条件とで大きく異なっている。

L0 モルタルと L1~L5 モルタルの相対動弾性係数の低下度の違いは、L0 モルタルが全粒径にわたって、約 30%の濁沸石を含んでいるのに対し、L1~L5 モルタルでは特定粒径に約 10%以下の濁沸石しか混合していないことに起因していると思われる。すなわち、濁沸石によるモルタルの劣化の程度は、濁沸石の含有量と混合粒径が関係していると考えられる。

そこで、L1~L5 モルタルの濁沸石含有量と材令 2,300 日前後における相対動弾性係数 (降雨条件のみ) との関係のみをみてみた (図-3)。図のように濁沸石含有量と相対動弾性係数との関係は、あまり明瞭ではない。しかし、L1 モルタルを除くと、相対動弾性係数は濁沸石含有量の増加によって減少する傾向がある。

図-4 は濁沸石含有量が約 10%である L1, L3, L4 モルタルの濁沸石混合粒径と図-3 と同材令における相対動弾性係数 (降雨条件のみ) との関係を示したものである。粒径が大きいものほど、相対動弾性係数の減少も大きいことがわかる。

3.2 偏光顕微鏡による形態観察⁶⁾

偏光顕微鏡による観察では、写真-1 に示すようにモルタルやコンクリートの劣化部では、濁沸石を含む骨材からセメントペーストに向かって放射状のひび割れが複数形成されていることが観察された。一部のひ

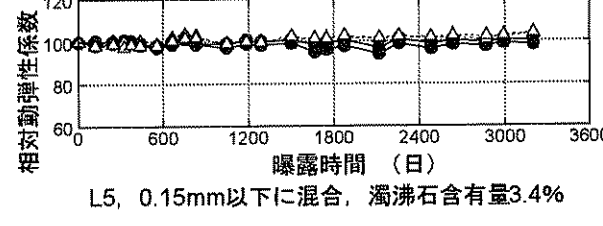
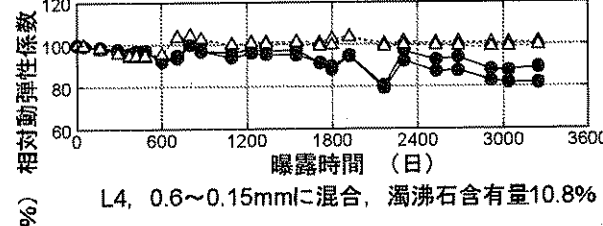
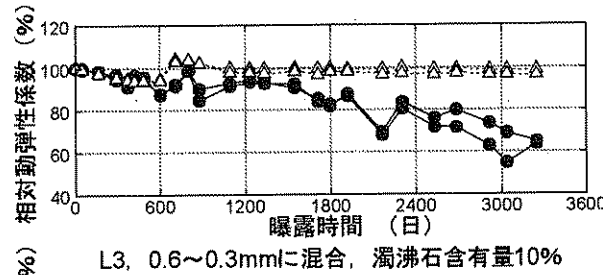
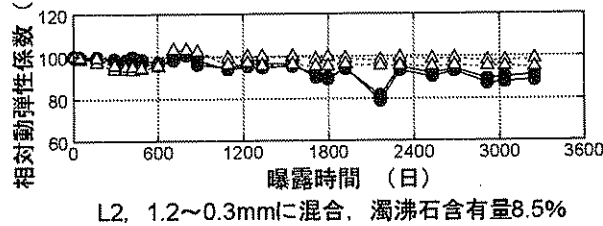
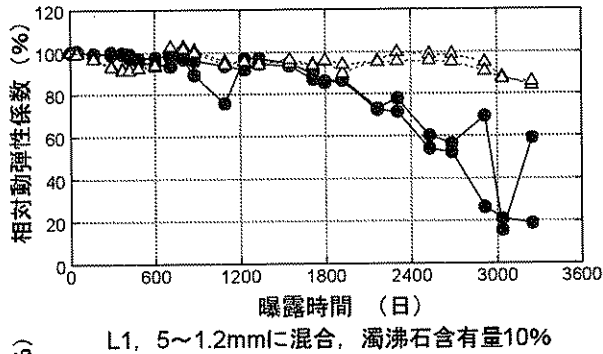
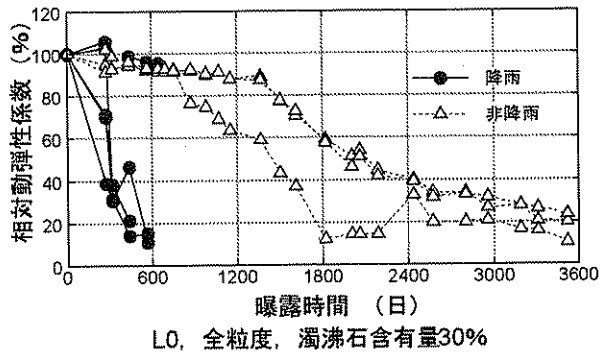


図-2 曝露試験結果

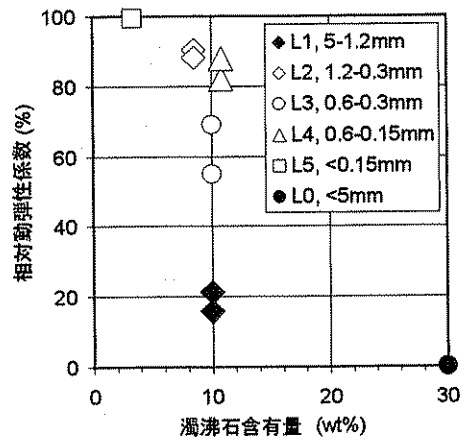


図-3 含有量と相対動弾性係数の関係

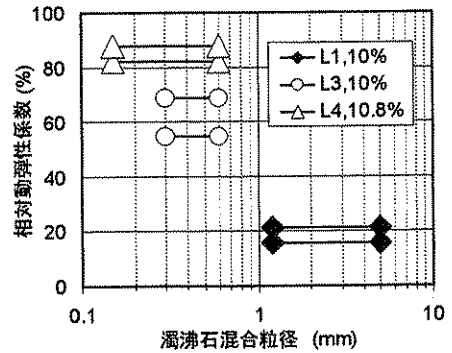


図-4 混合粒径と相対動弾性係数の関係

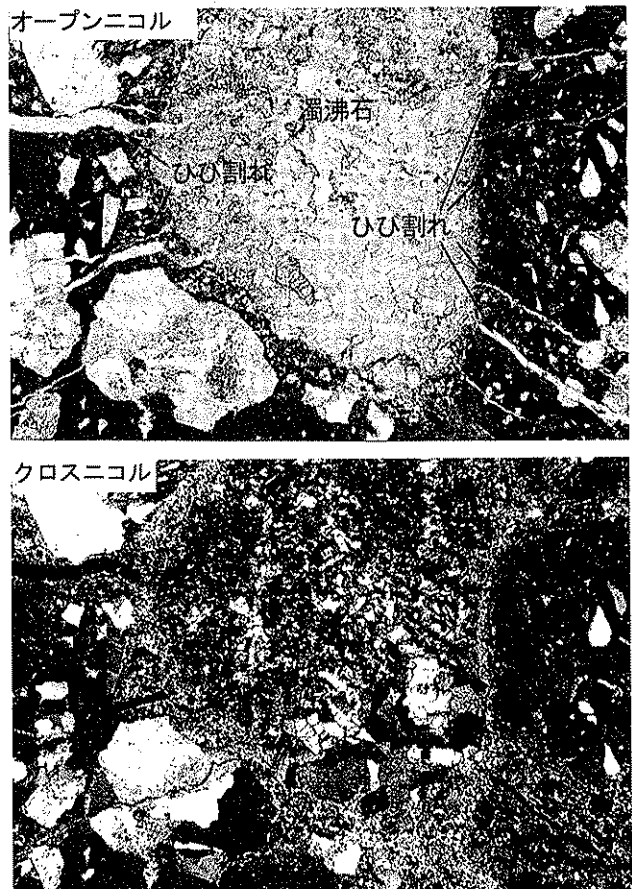


写真-1 劣化モルタル中の濁沸石

び割れは濁沸石結晶の中にも認められる。ペースト中のひび割れは内部が空隙であり、特別な反応生成物は認められなかった。また、ひび割れを伴った濁沸石の周辺およびひび割れの周辺には、微細な方解石が生成しており、炭酸化（中性化）していることが認められた。方解石は一部の濁沸石中のひび割れにも認められた。

一方、非降雨条件下で曝露したモルタルの内部では、濁沸石結晶の周囲にひび割れは認められなかった。

3.3 電子顕微鏡による形態観察および元素分析⁶⁾

3.3.1 形態観察

劣化モルタル中の濁沸石は、肉眼では白濁して見える。このような白濁した濁沸石は電子顕微鏡では、長柱状に粉状化した結晶として観察された（写真-2）。結晶間や濁沸石結晶とセメントペーストとの界面には、粒状物質が層状に侵入しているのが認められた。

非降雨条件下で曝露した健全モルタル中の濁沸石結



写真-2 粉状化した濁沸石結晶（SEM 画像）

晶は、劣化部と同様に粉状化しているものや粉状化しつつあるものが認められた。

3.3.2 濁沸石および生成物の化学組成

表-3 に元素分析の結果を示す。骨材原石中の濁沸石の化学組成（No.1~3）から濁沸石としての化学式を求めると、濁沸石の理想式 $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ に近い。降雨条件下で劣化したモルタル中の濁沸石の化学組成（No.4~9）は骨材原石中のものの組成に比べ CaO と K_2O が多い傾向があり、特にセメントペーストとの界面付近（No.6）ではこの傾向が顕著であり、 Al_2O_3 が減少している。このような組成の変化は濁沸石とセメントペーストとの間でイオン交換が生じていることを示唆している。一方、非降雨条件下におかれた健全なモルタル中の濁沸石の組成をみると、劣化モルタル中のものと同様の傾向を示す。このことは上記のイオン交換は劣化モルタル、健全モルタルに関わらず生じていることを示している。

劣化部の形態観察で確認された濁沸石の隙間に侵入した粒状物質は、高濃度の炭素とカルシウムが検出されたことと、四角形の形態から方解石と推測されたが、元素分析からも方解石であることが確認された。さらに、濁沸石骨材中の大きなひび割れ内部には、モノサルフェートが生成している（No.17）ことが確認された。また、骨材表層で粉状化した濁沸石とセメントペーストとの界面には、劣化の有無にかかわらず、CSHゲル（Al含有）が認められた（No.11~16）。

以上のように濁沸石のへき開中や周囲には、方解石、CSHゲル、モノサルフェートは認められたが、異常膨張の原因となりうる物質（アルカリシリカゲル・エトリンサイト、タウマサイト）や特殊な水和物（ハイド

表-3 骨材原石中およびモルタル中の濁沸石、モルタル中の生成物の化学組成

試料	L 骨材原石			L1 モルタル劣化部						L1 健全部	L1 モルタル劣化部						モノサルフェート
	濁沸石			濁沸石							CSHゲル						
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	47.96	48.29	47.66	46.86	47.41	43.40	49.73	51.41	48.70	49.83	21.38	29.91	32.83	16.38	21.25	21.57	3.07
TiO ₂	0.00	0.07	0.21	0.12	0.12	0.09	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10	0.07	0.31	0.32	0.00	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	20.24	20.54	20.34	20.42	21.17	16.83	22.79	21.77	20.86	20.29	2.24	5.33	9.88	6.84	4.78	6.91	17.61
Fe ₂ O ₃	0.74	0.00	0.04	0.00	0.00	0.10	0.65	0.00	0.57	0.48	0.20	0.51	0.09	0.26	0.51	1.09	1.19
MnO	0.05	0.00	0.00	0.28	0.28	0.00	0.47	0.46	0.00	0.00	0.00	0.11	0.17	0.00	0.00	0.06	0.06
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	10.84	10.83	10.85	11.00	11.20	14.68	11.31	11.61	11.85	11.16	34.82	28.29	20.58	39.00	32.75	39.39	36.66
Na ₂ O	0.14	0.18	0.00	0.11	0.00	0.28	0.28	0.10	0.13	0.23	0.00	2.02	0.09	0.00	0.23	0.45	0.01
K ₂ O	0.19	0.00	0.03	0.42	0.47	1.57	0.04	0.26	0.29	0.48	0.07	0.05	0.40	0.64	0.43	0.45	0.12
SO ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.61
Total	80.15	79.91	79.13	79.20	80.65	76.95	85.27	85.60	82.41	82.53	54.49	66.56	64.67	63.43	60.87	69.93	65.55

注) No.は、エネルギー分散型分析装置による微小部分の分析箇所（直径1μm以下）を示す

ロゲーレナイト、ハイドロカルマイト、モノカーボアルミネート)は検出されなかった。

3.4 X線回折分析の結果⁶⁾

X線回折分析によると、モルタルやコンクリートの劣化部には特別な水和物(エトリンガイト、タウマサイト、モノサルフェート、ハイドロカルマイト、モノカーボアルミネート、ハイドロゲーレナイト)は検出されず、ポートランドイトおよび方解石の通常の生成物が認められた。

3.5 膨張圧測定結果^{7),8)}

3.5.1 乾燥湿潤の繰り返しによる膨張圧の変化

図-5に表-2の各ケースごとの膨張圧の測定結果を示した。ケース1~3は、水を与えての湿潤と送風乾燥乾燥を繰り返した場合の膨張圧の測定結果である。

ケース1では、 0.23N/mm^2 の拘束圧をかけた試料に注水すると、図のように急激な圧力の上昇がみられ、 0.67N/mm^2 でピークに達した。その後、圧力は徐々に降

下し注水から2時間で 0.60N/mm^2 まで低下した。このような圧力の降下は、試料の側方を拘束していないため、結晶内部で劈開面のズレや再配列が生じたものと考えられる。圧力の低下が収束した時点で試料周囲の水を除去し、送風乾燥した。乾燥とともに圧力は降下し、乾燥開始から4時間で圧力はゼロとなった。試料の湿潤と乾燥を繰り返すと、図のように湿潤時には圧力は初期拘束圧を上回る程度の 0.3N/mm^2 程度まで上昇し、乾燥時にはゼロとなることが繰り返された。

ケース2も、湿潤直後に 0.82N/mm^2 の膨張圧のピークが表れたが、ケース1に比べ湿潤状態での圧力降下が急激であった。これはケース1に比べ、劈開面でのズレが大きかったためではないかと思われる。その後、ケース1と同様、湿潤と乾燥の繰り返しによって圧力の変化が生じているが、圧力の上昇は初期拘束圧程度にとどまった。

ケース3は、初期拘束圧が 0.14N/mm^2 と最も小さか

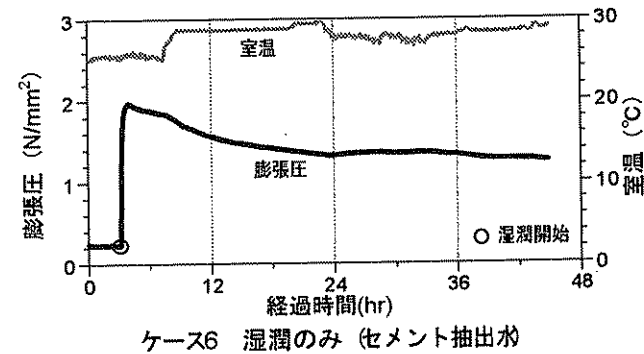
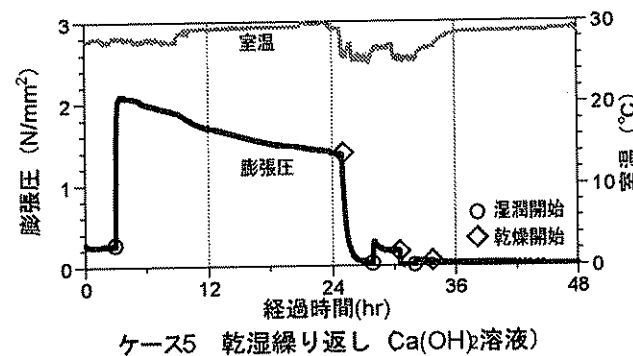
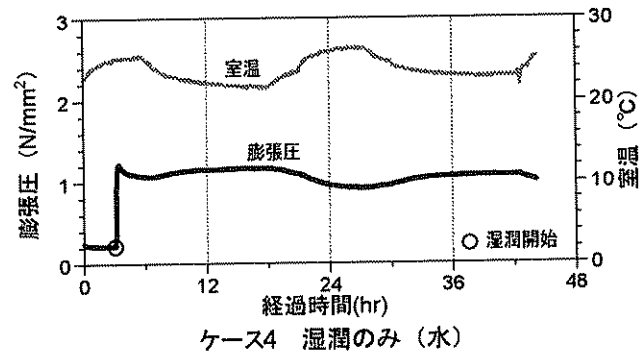
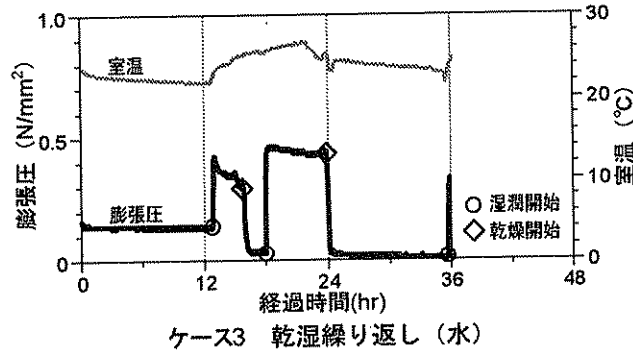
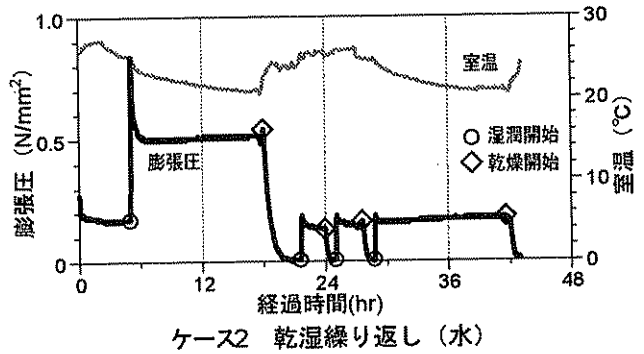
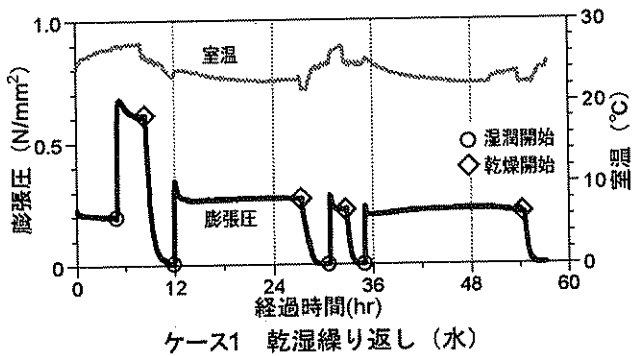


図-5 膨張圧測定結果

ったケースで、1回目の発生圧力は 0.43N/mm^2 と小さかったが、1回目よりも2回目の圧力(0.47N/mm^2)がやや大きいというケース1,2とは異なる傾向が見られた。3回目の湿潤直後には、結晶が崩壊してしまったため、圧力が急激に低下し圧力が測定できなくなった。

これら3ケースの全てで注水による膨張圧の発生と乾燥と湿潤の繰り返しによる膨張圧の変動が確認できた。濁沸石以外の方解石、束沸石、スコレス沸石、ソーダ沸石でも同様の試験を行ったところ、スコレス沸石で濁沸石の1/160程度のごくわずかな膨張圧が発生したが、それ以外では変化がみられなかった。このことは、注水による膨張圧発生が濁沸石に特有の現象であること示している。また、乾燥湿潤繰り返し後の濁沸石を電子顕微鏡で観察したところ、写真-2に類似した細片化が発生している事が確認された。このような細片化は、湿潤のみの濁沸石にはみられなかったことからモルタル中の細片化した濁沸石は、乾燥湿潤繰り返しによって形成されたものと考えられる。

3.5.2 溶液による膨張傾向の違い

ケース4は、溶液を水とした場合である。ケース4では、初期拘束圧が約3時間放置後に 0.22N/mm^2 で安定した状態で試料に注水した。注水直後から圧力は上昇し、 1.2N/mm^2 の最高値を示した後、徐々に低下し、 1N/mm^2 前後の値を保っている。

ケース5は、硬化コンクリート中で濁沸石が曝される擬似的な環境として、水酸化カルシウムの飽和溶液を用いて湿潤させ、乾燥と湿潤を繰り返した場合である。湿潤によるピーク(2.09N/mm^2)の発生とその後の圧力低下、2回目の圧力上昇が初期拘束圧程度となる傾向は、水を用いたケース1,2と同様である。

ケース6は、コンクリートの初期材令の環境を想定し、セメント抽出水を用いて湿潤を行ったものである。ケース6においても、他のケースと同様、湿潤によるピーク(1.97N/mm^2)の発生とその後の圧力低下の傾向が見られた。

これら3つのケースを含めた6つのケース全体の初期拘束圧と膨張圧の関係をみると正の相関があることから、濁沸石の膨張圧発生にはコンクリートの初期材令における水和反応など溶液の性質にかかわらず膨張圧の発生がみられることを示している。

3.5.3 濁沸石による膨張圧の発生機構

有泉³⁾は、レオンハルダイトと濁沸石の転移で1.5%の可逆的な体積変化が生じると述べている。Yamazaki *et.al.*⁹⁾は湿度を制御した

X線回折試験によって、 25°C の空气中で相対湿度を変化させた場合、表-4のように格子定数が増減し、相対湿度5~70%の状態から80~100%の状態への変化(レオンハルダイトと濁沸石の転移に相当)で2%程度の可逆的な体積変化が生じるとしている。また、Gottardi & Galli¹⁰⁾による格子定数から計算したレオンハルダイトと濁沸石の転移で生じる結晶格子レベルでの体積変化は、3%程度と見積もられる。今回の実験で確認された湿潤による膨張圧の発生と乾燥による圧力の低下という現象は、これらの結晶格子の変化から推定される体積変化に起因するものと考えられる。

結晶構造の変化について、Yamazaki *et.al.*⁹⁾は、相対湿度5~70%の状態から相対湿度80~100%の状態への変化で、*a*軸と*b*軸が伸び、*c*軸が縮み、 β も小さくなるとしているが、Gottardi & Galli¹⁰⁾の示した格子定数ではレオンハルダイトと濁沸石の転移で*a*, *b*, *c*全ての軸が伸び、 β が大きくなっている。両者の値には若干の矛盾があるが、レオンハルダイトと濁沸石の転移によって格子定数が増減する点では一致している。

また、Yamazaki *et.al.*⁹⁾は、湿潤過程の体積変化は速やかに生じ、逆に乾燥過程の体積変化は緩やかに生じるとしている。このことは、相対湿度と含水状態という実験条件の違いはあるが、膨張圧が湿潤によって速やかに発生し、乾燥によって生じる圧力の低下はそれに比べて緩やかであるという傾向と一致している。

4 濁沸石によるコンクリートの劣化機構

4.1 化学反応

偏光顕微鏡観察では、濁沸石からセメントペーストに向かって複数の放射状割れ目が認められた。ペースト中のひび割れは内部が空隙であり、膨張性を持つような反応生成物は認められなかった。また、電子顕微鏡による分析では、モルタルやコンクリートの劣化部では、濁沸石の結晶自体がへき開面に沿って粉状化し、その間に微細な方解石やCSHゲル(AIを含み一部炭

表-4 濁沸石の体積変化

格子定数	濁沸石 (25°C空气中) ⁹⁾			レオンハルダイト ¹⁰⁾	濁沸石 ¹⁰⁾
	相対湿度				
	0~5%	5~70%	80~100%		
<i>a</i>	14.71 Å	14.77 Å	14.85~14.90 Å	14.75 Å	15.04 Å
<i>b</i>	13.09 Å	13.09 Å	13.19 Å	13.07 Å	13.17 Å
<i>c</i>	7.46 Å	7.58 Å	7.55 Å	7.6 Å	7.71 Å
β	112.1°	112.0°	110.2°	111.9°	113.2°
H ₂ Oの分子量	12	14	16~18	14	16

酸化している)が侵入している。このことは濁沸石周辺で膨張性の物質が生成していないことを示している。X線回折試験でも、膨張性を持つような反応生成物は認められなかった。したがって、劣化には濁沸石とセメントペースト間の化学反応による膨張性の水和物の生成は関与していないと考えられる。

4.2 物理的要因

膨張圧測定により濁沸石の膨張圧の発生と湿潤と乾燥の繰り返しによる膨張圧の変動が確認されたこと、濁沸石の鉱物学的な性質から、劣化を引き起こす原因は濁沸石の体積変化であると考えられる。

膨張圧とコンクリートの破壊との関係について、和泉ほか¹¹⁾は、蛇紋岩骨材の膨張に起因するコンクリートのポップアウトを再現するため、モルタル内部にシリコンゴム球を埋め込み、油圧ジャッキによる膨張圧とポップアウトの発生の関係から以下の式を得ている。

$$p / \sigma_t = 11.95 d / l - 0.005$$

ここに、 p : ポップアウト発生圧力
 σ_t : モルタルの引張強度
 d : ゴム球の埋め込み深さ
 l : ゴム球の直径

曝露試験でポップアウトがみられたモルタルバーの圧縮強度は 69N/mm^2 であり、引張強度は 5.3N/mm^2 程度と見積られる。同じ曝露試験において、劣化が最も進行しているのは、 $1.2\sim 5\text{mm}$ の粒径の濁沸石含有岩石を配合したモルタルであることから、粒径の平均値 3mm を代入すると、表面から 1mm の深さに濁沸石が存在する場合に、ポップアウトが生じる圧力 (p) は、 21N/mm^2 となる。今回の実験で確認された膨張圧は最大で 2.09N/mm^2 に達しているものの、計算された値より一桁小さい値となっており、単純な引張破壊を生じるほどの圧力には達していない。

しかし、曝露供試体の劣化部の偏光顕微鏡観察結果では、濁沸石からモルタルに向かって放射状にのびる複数の割れ目が確認され、その内部が空隙となっていることから、体積変化による膨張性の破壊が生じていることは明らかである。膨張圧が湿潤と乾燥の繰り返しの応じて表れたこと、乾燥湿潤を繰り返した濁沸石が劣化したコンクリート中の濁沸石に似た細片化を生じていること、曝露試験による劣化は濁沸石を 10% 程度含むモルタルで曝露 $1,000$ 日目以降から徐々に進行していることを考えると、濁沸石の体積膨張による劣化は、単純な引張破壊ではなく、乾湿の繰り返しによる膨張圧の変動による疲労破壊によって引き起こされていると考えられる。

4.3 コンクリートの劣化機構

曝露試験で確認された劣化の進行と濁沸石によるコンクリートの劣化は、次のようなステップで進行すると推定される。

- ①コンクリートの表面が乾燥し始めると、濁沸石の体積収縮が徐々に生じ、降雨などでコンクリート表面が湿潤状態となると、水の浸入に従って表面に近い部分から濁沸石の体積膨張が生じる
- ②乾燥湿潤の繰り返しによって、骨材とセメントペーストの付着面で膨張圧の変動が生じ、疲労性の破壊が発生する。
- ③長期にわたる湿潤と乾燥の繰り返しによって、疲労破壊による割れ目が進展し、周囲のコンクリートの強度が低下する。同時に中性化も促進される。
- ④進展した割れ目がコンクリート表面に達するとポップアウトやコンクリート表面の剥落が発生する。
- ⑤濁沸石の結晶中でも結晶構造の変化に起因したひび割れが進行し、粉状化してゆく。

4.4 劣化機構に基づく有効利用法

1) 曝露条件

濁沸石を含む骨材に湿潤と乾燥の繰り返しを与えない環境であれば、膨張圧の変動も発生せず、劣化も発生しないと考えられる。したがって、内部コンクリートのように湿潤と乾燥の繰り返しが乏しい箇所に配置する方法やコンクリート中の湿度を保持できるように樹脂等でコーティングする方法が考えられる。

2) 細骨材として利用

$0.6\sim 0.15\text{mm}$ の粒径の濁沸石を添加したモルタルでは 10% 程度の含有量であっても降雨条件での動弾性係数の低下が小さいことから、濁沸石の粒径が小さい場合には発生する膨張圧の絶対量が小さく、コンクリートの劣化には関与しないと考えられる。したがって、このような細粒部分のみに濁沸石を含むものは細骨材として利用できる可能性がある。濁沸石の岩石中の分布状態はサイトごとに異なっているので、利用に当たっては製造される骨材の粒度ごとの濁沸石含有量の試験や曝露試験を実施して判断する必要がある。

3) 劣化したコンクリートの補修

濁沸石による劣化の進行は乾燥湿潤の繰り返しに依存するので、劣化の初期段階であればコンクリート中の濁沸石の水分状態を管理することで劣化を抑制できる可能性がある。

5. まとめ

濁沸石を含む岩石を骨材としたコンクリートやモルタルの劣化は、濁沸石の湿潤による膨張圧の発生と湿

表-5 鉱物によるコンクリートの劣化と有効利用法

鉱物	問題となる現象	機構	有効利用法
スメクタイト ¹²⁾⁻¹⁶⁾	過早凝結	スメクタイト中のCaイオンとモルタル中のKイオンがイオン交換することで、石膏の反応が抑制され、セメント中のC3AやC3Sが急速に水和反応し凝結する	○骨材製造過程での除去 スメクタイトが粉碎されやすい性質を利用 ○混和剤による凝結反応の抑制 超遅延剤による始発時間の遅延
黒雲母 ¹⁴⁾⁻¹⁸⁾	ワーカビリティの低下	雲母の薄片状の形態によって、見掛け上硬くなる	○粗骨材としての利用 黒雲母が単体として分離しない状態であれば利用可能 ○骨材製造過程での除去 雲母を選択的に細片化させて除去 ○単位水量を増加させる フロー値の改善 ○養生期間を長くする 強度の増加 ○セメント量の増加 強度の増加
	圧縮強度の低下	圧縮軸に対して特定の角度で配列する雲母に沿ってすべり破壊が生じる	
	引張強度の低下	雲母表面が滑らかであるために付着強度が低い	
	凍結融解抵抗性の低下	引張強度の低下と空気連行性の低下	
濁沸石 ⁴⁾⁻⁸⁾	亀裂、ポップアウト、剥離の発生	濁沸石の濁沸石の湿潤による膨張圧の発生と湿潤と乾燥の繰り返しによる膨張圧の変動に起因する疲労破壊	○曝露条件の管理 乾湿繰り返しのない条件での利用 ○細骨材としての利用 細粒の濁沸石であれば利用可能

潤と乾燥の繰り返しによる膨張圧の変動に起因する疲労破壊によるものと推定され、曝露環境や骨材中の濁沸石の粒径に配慮することで利用が可能である。

表-5に、スメクタイトと黒雲母を含めた劣化機構と有効利用法をまとめた。

参考文献

- Pearson, J. C. and Loughlin, G. F. (1923) : A interesting case of dangerous aggregate, *Proc. Am. Con. Inst.*, 19, pp.142~154.
- American Society for Testing and Materials (1969) : Standard descriptive nomenclature of constituents of natural mineral aggregates. ASTM Designation : C294-69, 1969 Book of ASTM Standards with Related Material, Part 10, Concrete and Mineral Aggregates, pp.219~229.
- 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, pp.41~55.
- 脇坂安彦・阿南修司(2001) : 濁沸石によるコンクリートの劣化と劣化機構, 平成13年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.83~86.
- 脇坂安彦・阿南修司(2002) : 曝露による濁沸石含有モルタルの劣化と劣化機構の推定, 第57回年次学術講演会講演概要集, (社)土木学会, pp.1085~1086.
- 脇坂安彦・阿南修司(2002) : 濁沸石によるコンクリートの劣化機構—偏光顕微鏡・SEM観察および化学分析による確認—, 平成14年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.59~62.
- Wakizaka, Y. and Anan, S. (2003) : Deterioration of concrete due to laumontite and its mechanism, *Proc. Int. Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, IAEG*, pp.647~654.
- 阿南修司・脇坂安彦・伊藤政美・佐々木靖人(2003) : 濁沸石によるコンクリート劣化機構—濁沸石による膨張圧の発生—, 平成15年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.105~108.
- Yamazaki, A., Shiraki, T., Nishido, H. and Otsuka, R. (1991) : Phase change of laumontite under relative humidity-controlled conditions, *Clay Science*, Vol.8, No.2, pp.79~86
- Gottardi, G. and Galli, E. (1985) : *Natural Zeolite*, Springer-Verlag, pp.100~110.
- 和泉意登志・嵩英雄・篠崎征夫・奥野亨(1981) : 蛇紋石骨材に起因するコンクリートのポップアウトについて, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.149~152.
- 脇坂靖彦・市川慧・藤原靖・宇治公隆・林順三・三谷哲・前田照信・佐々木肇(1993) : モンモリロナイト族鉱物含有骨材を使用したコンクリートの凝結特性, 応用地質, Vol.35, No.5, pp.209~222.
- Wakizaka, Y., Ichikawa, K., Fujiwara, Y., Uji, K., Mitani, S., Maeda, T., and Sasaki, H. (1994) : Influence of montmorillonite group bearing aggregates on concrete, *Proc. 7th Int. Congr. IAEG*, pp.3285~3294.
- 脇坂安彦・藤原靖(1998) : ダムコンクリートにおける粘土鉱物含有骨材の有効利用, セメント・コンクリート, No.618, pp.93~103.
- 脇坂安彦・阿南修司(2000) : いわゆる有害鉱物によるコンクリートの劣化, 第107年学術大会講演要旨, 日本地質学会, p.209.
- Wakizaka, Y., Ichikawa, K., Nakamura, Y. and Anan, S. (2001) : Deterioration of concrete due to specific minerals, *Proc. Aggregate 2001 -Environment and Economy-*, Tampere University of Technology, 51-2, pp.331~338.
- 脇坂安彦(2000) : 疑似雲母を混入したモルタルの性質, 平成12年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.33~36.
- 脇坂安彦(2001) : 雲母を混入したモルタルの品質低下現象, 土木技術資料, Vol.43, No.10, pp.56~61.