

## 1-1 有害鉱物を含むダムコンクリート骨材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 16～平 19

担当チーム：地質チーム

研究担当者：佐々木 靖人、浅井 健一

### 【要旨】

コンクリートの様々な品質を低下させる有害鉱物のうち黄鉄鉱について、曝露試験体を作製して曝露試験を行うとともに、曝露を行った試験体の偏光顕微鏡による観察、電子顕微鏡による観察および化学分析を行い、劣化機構および劣化の抑制手法について検討を行った。曝露試験では、いずれの試験体においても相対動弾性係数が急速に低下する様子は現段階では見られないとともに、曝露条件（屋外・室内）、骨材の酸化処理の有無、試験体の中性化処理の有無による差は明確でなかった。また、いずれの試験体においても外観に亀裂、剥離等の劣化現象は認められなかった。また、偏光顕微鏡観察、電子顕微鏡観察および分析では、黄鉄鉱がコンクリート中で変質する場合には、水酸化鉄・グローベライト・エトリングライト・石膏などが変質物として生じることが示されたが、観察された変質物は少量であり、黄鉄鉱とコンクリートあるいはモルタルが激しく反応して劣化が急速に進行する様子は認められなかった。以上の結果から、少なくとも黄鉄鉱含有量が 5 wt% 以内であれば、ダムの内外部コンクリートのように外部から水や空気が侵入しない条件下では、黄鉄鉱によるコンクリートの劣化はほとんど進行しないと考えられる。

キーワード：有害鉱物、黄鉄鉱、曝露試験、偏光顕微鏡、電子顕微鏡

### 1. はじめに

近年、地質条件の良好な原石山の減少により、採取されるコンクリート用骨材の歩留まりが低下し、原石山の掘削量が増加する傾向にある。このような状況下で、環境面における社会的要求から、原石山の掘削量軽減を図るために、原石の廃棄量を抑えることが求められている。

原石の廃棄の一因として、コンクリートの様々な品質を低下させる有害鉱物の存在がある。したがって、原石の廃棄量を抑えるためには、従来は廃棄対象となっていた有害鉱物を含む骨材について、有害鉱物による劣化を抑制しながら有効利用する方法を確立することが必要である。

土木研究所地質チームでは、旧土木研究所地質研究室時代を含め、有害鉱物といわれているもののうちこれまでにアルカリシリカ反応性鉱物、スメクタイト、黒雲母、濁沸石について、各鉱物を含む骨材を使用する場合の劣化抑制方法の検討を行ってきた。

本研究では、有害鉱物のうち黄鉄鉱について、試験体の曝露試験を行うとともに、曝露を行った試験体の偏光顕微鏡による観察、電子顕微鏡による観察および化学分析を行い、劣化機構および劣化の抑制手法について検討を行った。

### 2. 黄鉄鉱がコンクリートへ及ぼす影響に関する既往の研究

黄鉄鉱 (pyrite) は硫化鉄鉱の一種で、化学組成は  $\text{FeS}_2$  である。骨材に黄鉄鉱が含まれる場合のコンクリートへの影響について、コンクリート構造物の耐久性診断・評価手法に関する JCI 基準案 (その 3) <sup>1)</sup> では、黄鉄鉱などの硫化物が「コンクリート中で酸素と水酸化カルシウムの存在により分解し、コンクリートに害を与えることがある。」とされている。田村 <sup>2)</sup> は、「コンクリートへの空気や湿気の侵入の結果、酸化して有害である。」と述べている。川村 <sup>3)</sup> は、「黄鉄鉱や磁硫鉄鉱のような第一鉄の形で鉄を含有する鉱物が骨材中に存在し、それが容易に酸化する状態にあるとき、そのような岩石をコンクリート用の骨材に使用すると、コンクリートは重大な損傷を受けることがある。」と述べ、そのような事例が英国、ノルウェー、カナダ、南アフリカに見られるとしている。丸・柳田 <sup>4)</sup> は硫化物による弊害が現れる原因を「 $\text{FeS}_2 + \text{O}_2 + 2\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{水} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 」などの反応に見られる膨張反応と水酸化鉄による変色、生成した硫酸による 2 次反応」

と述べている。以上のことから、黄鉄鉱によるコンクリート劣化は、水や空気（酸素）の侵入によりコンクリート中の黄鉄鉱が酸化されるために生じると考えられていることがわかる。

### 3. 研究方法

#### 3.1 黄鉄鉱含有骨材を用いたコンクリートおよびモルタルの曝露試験

一般的な環境下において黄鉄鉱がコンクリートに与える影響とその機構を解明することを目的に、黄鉄鉱を含有した骨材を用いたコンクリートおよびモルタルの曝露試験を実施した。作成した曝露試験体および使用した骨材は以下のとおりである。

(1) コンクリート試験体および試験用骨材  
 コンクリートの曝露試験体に用いた骨材は、島根県産の花崗岩(granite)（以下、Gr）、閃緑岩(diorite)

表-1 黄鉄鉱含有コンクリート試験体に用いた骨材の黄鉄鉱含有量

採取年度	岩種	黄鉄鉱含有量(wt%)	
		粗骨材	細骨材
1997	Gr	2.17	1.86
	Di1	3.50	3.09
	Di2	5.45	4.36
	Pr	6.82	6.90
2000	Gr	0.32	0.25
	Di1	5.14	4.46
	Di2	4.03	5.83
	Pr	7.81	4.31

表-2 曝露試験用の黄鉄鉱含有コンクリート試験体

試験体 作製年度	使用骨材の 採取年度	骨材処理	試験体処理	骨材組合せ 粗骨材/細骨材	黄鉄鉱含有量 (wt%)	曝露試験条件	
						屋外曝露	室内放置
1997	1997	無処理	無処理	Gr/Gr	2.03	○	
				Di1/Di1	3.31	○	
				Di2/Di2	4.95	○	
				Pr/Pr	6.86	○	
				Gr/Di1	2.61	○	
				Gr/Di2	3.21	○	
				Gr/Pr	4.44	○	
1999	1997	無処理	無処理	Gr/Gr	2.01	○	
				Di1/Di1	3.29	○	
				Di2/Di2	4.91	○	
				Pr/Pr	6.86	○	
				Di2/Di1	4.26	○	
				Di1/Di2	3.93	○	
				Di1/Pr	5.20	○	
		酸化処理	無処理	Gr/Gr	2.02	○	
				Di1/Di1	3.29	○	
				Di2/Di2	4.93	○	
				Pr/Pr	6.86	○	
				Di2/Di1	4.32	○	
				Di1/Di2	3.91	○	
				Di1/Pr	5.13	○	
2000	2000	無処理	無処理	Gr/Gr	0.29	○	○
				Di1/Di1	4.80	○	○
				Di2/Di2	4.93	○	○
				Pr/Pr	6.07	○	○
				Di1/Gr	2.75	○	
				Di2/Gr	2.17	○	
				Pr/Gr	4.15	○	○
				Pr/Di1	6.16	○	
				Pr/Di2	6.84	○	
				酸化処理	中性化処理	Gr/Gr	0.29
		Di1/Di1	4.80			○	
		Di2/Di2	4.93			○	
		Pr/Pr	6.07			○	
		Di1/Gr	2.75			○	
		Di2/Gr	2.17			○	
		Pr/Gr	4.15			○	

およびひん岩(porphyrityte) (以下, Pr) である。閃緑岩はさらに変質度の小さいもの (以下, Di1) と大きいもの (以下, Di2) に区分した。これらの骨材はすべて黄鉄鉱を含有しているが, 含有量は表-1 に示すように岩種によって異なり, Pr が最も多く, Gr が最も少ない。これらをそれぞれ粗骨材用および細骨材用に粒度調整し, 表-2 に示す粗骨材/細骨材の組合せによって大きさ10cm×10cm×40cmのコンクリート曝露試験体を作製した。なお, 上記の骨材をそのまま用いた試験体のほか, 骨材を2%の過酸化水素水に120時間浸漬することにより強制的に酸化させて用いた試験体, および同様に強制的に酸化させた骨材を用いて作製した試験体を5%の炭酸ガス中に12週間曝露することにより中性化させた試験体も準備した。

これらの曝露試験体を屋外の降雨が当たる条件および室内の降雨が当たらない条件に分け, 土木研究所構内で曝露試験を実施し(写真-1)、定期的に

一次共鳴振動数の測定および外観の観察を行った。曝露期間は長いもので約11年, 短いもので約7年である。  
(2) モルタル試験体および試験用骨材

モルタルの曝露試験体に用いた骨材は, 黄鉄鉱を含有しない碎石および黄鉄鉱塊を粉碎し, 粒径別に分級して作製した。こ

表-3 曝露試験用の黄鉄鉱含有モルタル試験体

黄鉄鉱混合粒径	黄鉄鉱混合比率 (wt%)	曝露試験条件	
		屋外暴露	室内放置
—	0	○	○
5~2.5mm	5	○	○
	10	○	○
2.5~1.2mm	5	○	○
	10	○	○
	15	○	○
	20	○	○
1.2~0.6mm	5	○	○
	10	○	○
	15	○	○
	20	○	○
0.6~0.3mm	5	○	○
	10	○	○
	15	○	○
	20	○	○
0.3~0.15mm	5	○	○
	10	○	○
	15	○	○
	20	○	○
≤0.15mm	5	○	○
	10	○	○

表-4 黄鉄鉱粒ないし黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだ曝露試験用のモルタル試験体

埋め込んだ粒の種類	埋め込み深さ	埋め込み数	曝露試験条件		
			屋外暴露	室内暴露(恒温槽)	
				20℃一定・乾燥条件	30℃一定・高湿度条件
黄鉄鉱粒 (国内の鉱山産の黄鉄鉱塊を粉碎して作成)	3mm	2粒(試験体の相反する2面の中心から所定の深さ)	○	○	○
	10mm	2粒(試験体の相反する2面の中心から所定の深さ)	○	○	○
	20mm	2粒(試験体の相反する2面の中心から所定の深さ)	○	○	○
	50mm	2粒(試験体の中心)	○	○	○
黄鉄鉱含有泥岩粒 (フランボイダルな黄鉄鉱粒子を含む国内産の泥岩を粉碎して作成)	3mm	2粒(試験体の相反する2面の中心から所定の深さ)	○	○	○
	10mm	2粒(試験体の相反する2面の中心から所定の深さ)	○	○	○
	20mm	2粒(試験体の相反する2面の中心から所定の深さ)	○	○	○
	50mm	2粒(試験体の中心)	○	○	○



写真-1 黄鉄鉱含有コンクリート曝露試験 (屋外)



写真-2 黄鉄鉱含有モルタル曝露試験 (屋外)

れらを黄鉄鉱含有量および含有する粒径が表-3となるように調整し、大きさ4cm×4cm×16cmのモルタル曝露試験体を作製した。

これらの曝露試験体をコンクリート試験体の場合と同じく、屋外の降雨が当たる条件および室内の降雨が当たらない条件に分け、土木研究所構内で曝露試験を実施し(写真-2)、定期的に一次共鳴振動数の測定および外観の観察を行った。曝露期間は約6年である。

(3) 黄鉄鉱粒ないし黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル試験体

黄鉄鉱粒ないし黄鉄鉱含有泥岩粒をモルタル(黄鉄鉱を含有しない骨材を使用)中に深さ別に埋め込んだ試験体を作成した。埋め込んだ黄鉄鉱粒は黄鉄鉱塊を砕いて10~20mm程度(20mmのふるいを通し10mmのふるいで留まるもの)程度の大きさにしたもの、黄鉄鉱含有泥岩粒はフランボイダルな黄鉄鉱粒子を含んだ泥岩を砕いて同じく10~20mm程度の大きさにしたものを使用した。

試験体の大きさは10cm×10cm×10cmの立方体、埋め込み深さは3mm、10mm、20mm、50mmとし、埋め込み箇所は立方体側面の中央とした(表-4)。作製方法は、モルタルを型枠の半分の深さまで打設し、モルタルの固さが粒が沈まなくなる程度になった後、型枠側面のうち相反する2つの面から所定の深さの位置に黄鉄鉱粒または泥岩粒を置き、残りのモルタルを打設した(写真-3)。したがって、1試験体あたり2つの黄鉄鉱粒または泥岩粒が埋め込まれている。た

だし、深さ50mmの場合は埋め込み位置が立方体の中心となるため、埋め込んだ粒は1つである。

これらの曝露試験体を、屋外の降雨が当たる条件、恒温槽内の温度20°C(一定)・乾燥条件、および恒温槽内の温度30°C(一定)・高湿度条件に分け、土木研究所構内で曝露試験を実施し、定期的に外観の観察を行った。曝露期間は約3年である。なお、曝露試験体はすべて、モルタル上半分と下半分の打



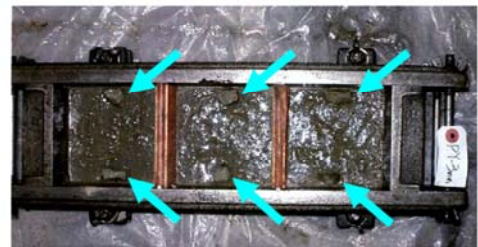
(1) 埋め込み用黄鉄鉱粒



(2) 埋め込み用泥岩粒



(3) 下半分のモルタル打設



(4) 埋め込み用粒の設置(矢印)  
埋め込み深さ3mm(深さ10mmおよび20mmの場合も同様に設置)



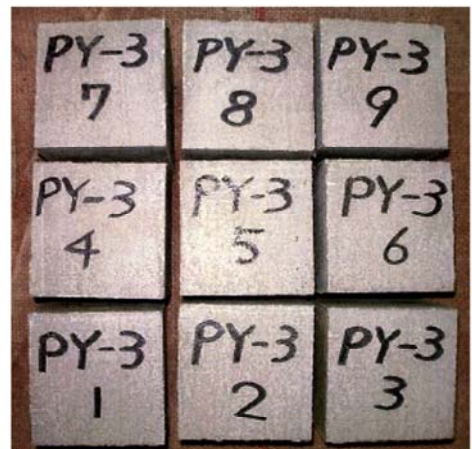
(6) 上半分のモルタル打設



(5) 埋め込み用粒の設置(矢印)  
埋め込み深さ50mm(立方体の中心に設置)



(7) モルタル打設後の均し



(8) 脱型

写真-3 黄鉄鉱粒ないし黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル試験体の作製

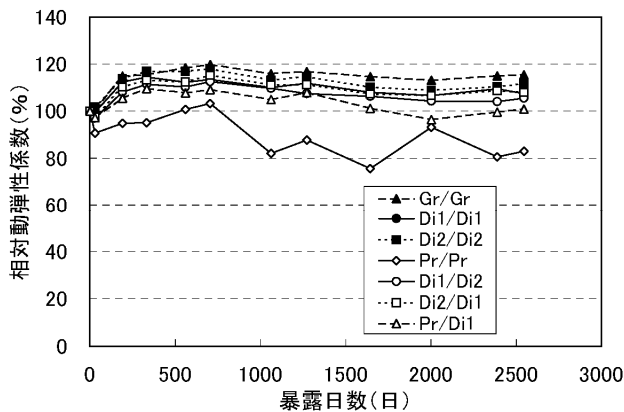
ち継ぎ目が水平となるよう、かつ黄鉄鉱粒ないし泥岩粒を埋め込んだ2面が南北の側面となるよう置いた。

### 3. 2 偏光顕微鏡観察

曝露試験体の一部について、薄片を作成し、モルタルおよび黄鉄鉱の周辺ならびに変質生成物等に関する偏光顕微鏡観察を行った。なお、薄片は3.3の電子顕微鏡による観察および分析が行えるよう、研磨薄片とした。観察は、下方ポーラー、直交ポーラーおよび反射光下で行った。

### 3. 3 電子顕微鏡による観察および分析

偏光顕微鏡観察を行った研磨薄片の一部について、



生成した劣化物などの確認のため、モルタルおよび黄鉄鉱の周辺ならびに変質生成物等に関する電子顕微鏡による観察および分析を行った。

観察は走査型電子顕微鏡を用いて形態観察を実施した。分析は、走査型電子顕微鏡に付属するエネルギー分散型スペクトル分析装置を用いて、元素毎に面的分布を分析する元素マッピングと、微小部分を選択して分析する定量化学分析を行った。

## 4. 研究結果

### 4. 1 コンクリート試験体の曝露試験結果

コンクリート試験体の曝露試験結果の例として、

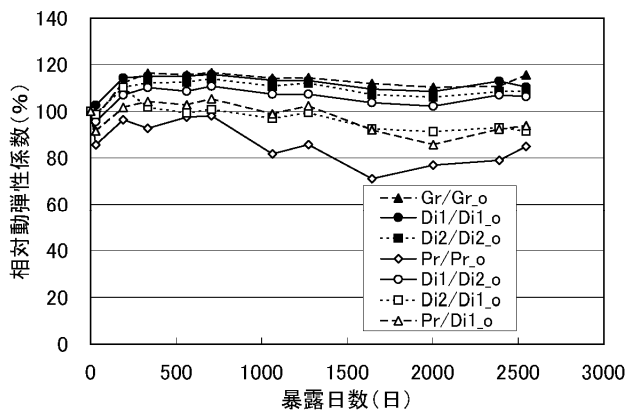


図-1 黄鉄鉱含有コンクリート試験体の相対動弾性係数の経時変化の例  
(1999年度作成 左：通常の骨材を用いたもの 右：酸化処理した骨材を用いたもの)

曝露	種別
+	黄鉄鉱 未含有
○	黄鉄鉱 5%配合
△	黄鉄鉱 10%配合
□	黄鉄鉱 15%配合
◇	黄鉄鉱 20%配合

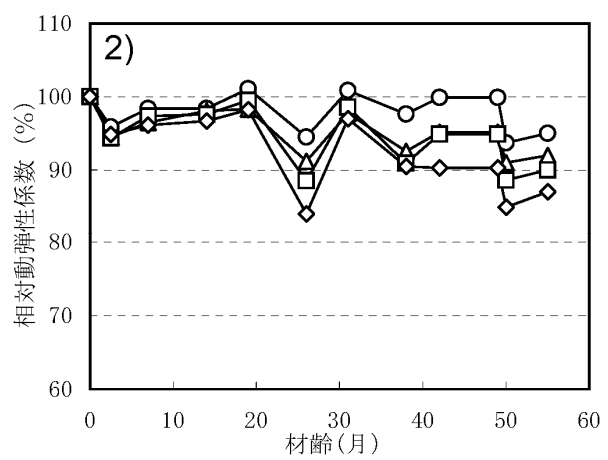
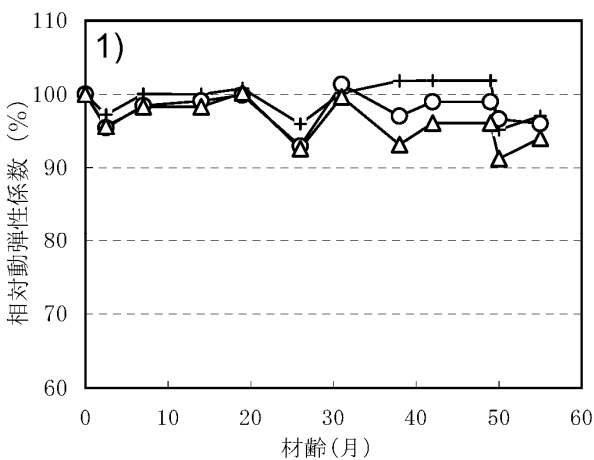


図-2 黄鉄鉱含有モルタル試験体の相対動弾性係数の経時変化の例

(2001年度作成 1):黄鉄鉱未含有および5~2.5mm粒径に5~20%含有したもの 2):黄鉄鉱を2.5~1.25mm粒径に5~20%含有したもの)

1999 年度に作製した試験体の相対動弾性係数の経時変化を図-1に示す。ここで、相対動弾性係数は一次共鳴振動数から求められ、初期値(100%)に対する割合で示される。この値は試験体の劣化程度を示す指標となる(低いほど劣化が進んでいることを示す)。大半の試験体では相対動弾性係数は試験開始時の90~100%あるいはそれ以上を保っている。黄鉄鉱含有量の最も多い Pr/Pr の骨材組合せによる試験体では相対動弾性係数が70~80%程度のものが見られるが、これらも70~80%程度の値を保っており、急速に低下する様子は現段階では見られない。この傾向は、酸化処理を行っていない骨材を用いた試験体と酸化処理した骨材を用いた試験体のいずれも同じであるとともに、図には示していないが他の試験体も同じ傾向にあり、曝露条件(屋外・室内)、骨材の酸化処理の有無、試験体の中性化処理の有無による差は明確でなかった。また、いずれの試験体においても外観に亀裂、剥離等の劣化現象は認められなかった。

#### 4.2 モルタル試験体の曝露試験結果

モルタル試験体の曝露試験結果の例として、黄鉄鉱を含有していない試験体、黄鉄鉱を5~2.5mm粒径に含有した試験体および黄鉄鉱を2.5~1.2mm粒径に含有した試験体の相対動弾性係数の経時変化を図-2に示す。黄鉄鉱含有の有無および含有量の違いにかかわらず、いずれの試験体においても相対動弾性係数は試験開始時の80~100%程度を保っており、急速に低下する様子は現段階では見られ



写真-4 黄鉄鉱粒を埋め込んだモルタル曝露試験体に生じた割れ目(屋外)

ない。この傾向は、図には示していないが他の試験体も同じ傾向にあり、黄鉄鉱含有の有無および含有量の違いによる差は明確でなかった。また、いずれの試験体の外観も亀裂、剥離等の劣化現象は認められなかった。

#### 4.3 黄鉄鉱粒ないし黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル試験体の曝露試験結果

黄鉄鉱粒ないし黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル試験体の曝露試験結果の例として、屋外曝露を行った試験体の外観の例を写真-4に示す。屋外曝露試験体では、黄鉄鉱粒を埋め込んだ試験体、黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだ試験体とも、埋め込み深さに関わらずすべての試験体において、曝露開始

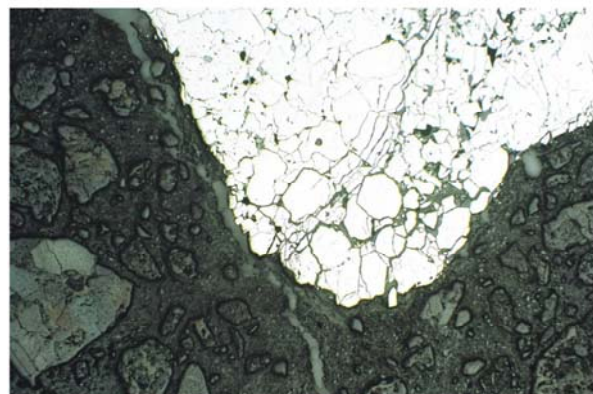
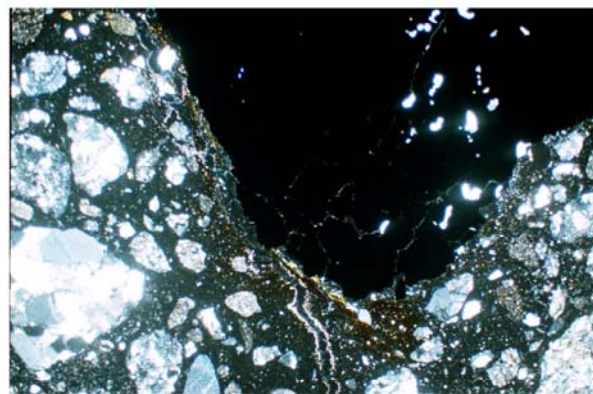
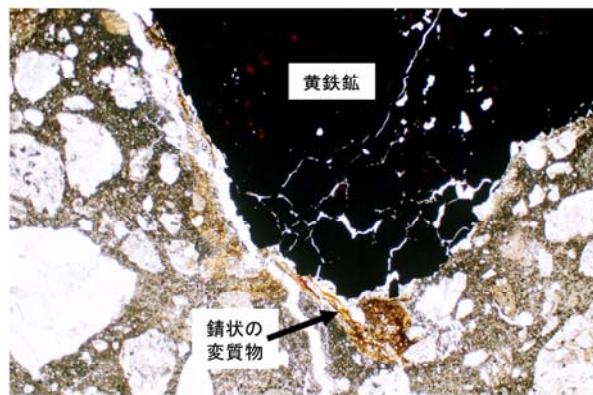


写真-5 黄鉄鉱粒を埋め込んだモルタル曝露試験体(屋外暴露)の偏光顕微鏡写真(1)

から8ヶ月の時点で、打ち継ぎ目の位置に水平方向の割れ目が生じていた。一方、恒温槽内の曝露試験体では、20°C・乾燥条件、30°C・高湿度条件とも、曝露開始から約3年経過した時点でもこのような割れ目は生じていない。

なお、割れ目を生じた屋外曝露試験体においては、いずれの試験体とも、錆汁等が割れ目から外へ析出している様子は曝露開始から約3年経過した時点でも認められていない。

#### 4.4 偏光顕微鏡観察結果

写真-5は黄鉄鉱粒を深さ3mmに埋め込んだ屋外曝露試験体の偏光顕微鏡写真である。割れ目内に錆状の変質物が認められた。ただし観察された変質物は少量で、割れ目の全体にわたって変質物が生じているわけではなく、変質物が割れ目を押し広げたような様子は認められなかった。

写真-6は黄鉄鉱粒を深さ3mmに埋め込んだ別の屋外曝露試験体の偏光顕微鏡写真である。変質物が生じている部分の割れ目の両側の形状が類似している部分が観察された(写真-6左)ことから、この部分は、変質物が生成した後に割れ目が生じて両側に分かれたと考えられる。そのほか、気泡と接する部分に変質物が生じているのが観察された(写真-6右)。なお、この試験体においても多量の変質物が生じて割れ目を押し広げたような様子は認められなかった。

写真-7は黄鉄鉱含有泥岩粒を深さ3mmに埋め込んだ屋外曝露試験体の偏光顕微鏡写真である。泥岩中の割れ目内に錆状の変質物が認められる。ただし観察された変質物は少量で、割れ目の全体にわたって変質物が生じているわけではなく、変質物が割れ目を押し広げたような様子は認められなかった。

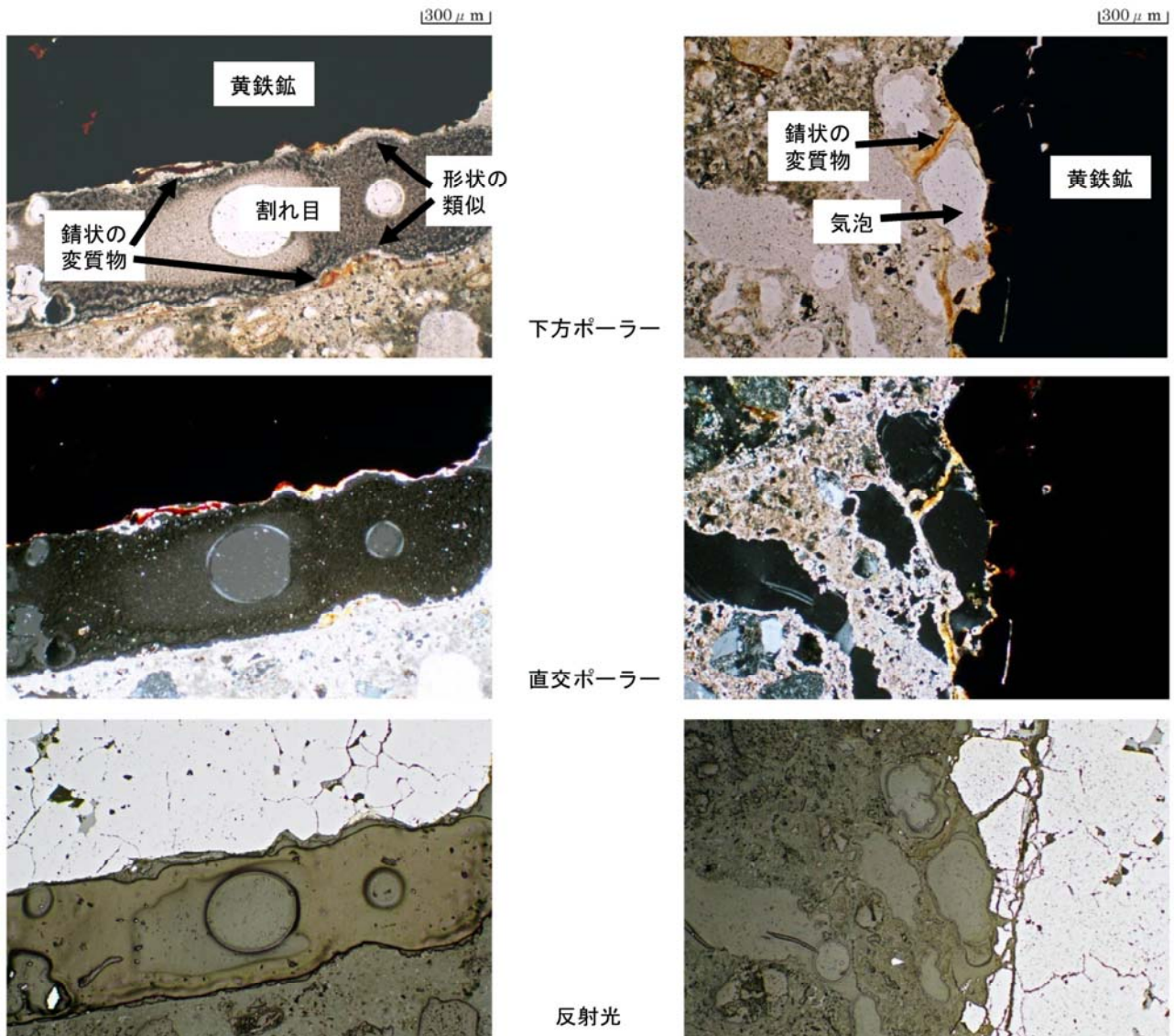


写真-6 黄鉄鉱粒を埋め込んだモルタル曝露試験体(屋外曝露)の偏光顕微鏡写真(2)

写真-8は黄鉄鉱含有泥岩粒を深さ 3mm に埋め込んだ別の屋外曝露試験体の偏光顕微鏡写真である。多量の変質物が生じている様子は認められない。また、泥岩中には小さな黄鉄鉱粒子が含まれているのが観察される。

写真-9は黄鉄鉱粒を深さ 3mm に埋め込み、恒温槽内において 30 ° C ・高湿度条件で曝露を行った試験体の偏光顕微鏡写真である。黄鉄鉱粒と気泡が接する部分に錆状の変質物が認められた。しかしながら、試験体周囲が高湿度であったにもかかわらず、黄鉄鉱粒の周囲全体にわたって変質物が生じている様子は認められず、黄鉄鉱自体も変質していない。

写真-10 は屋外曝露を行ったコンクリート試験体の偏光顕微鏡写真である。この試験体は 1997 年度作製の試験体で、粗骨材、細骨材とも Pr を使用し、黄鉄鉱含有量が 6.86wt% とコンクリート試験体中では最も高い。相対動弾性係数は約 80% となっているが、急速に低下する傾向は現段階では見られない。顕微鏡下では骨材とセメントペーストの境界に変質物は認められなかった。

#### 4. 5 走査型電子顕微鏡観察および分析結果

写真-11 は写真-5 に示したのと同じ薄片内の電子顕微鏡写真である。黄鉄鉱表面からセメントペーストにかけて板状の生成物が認められる。この部分の元素マッピング結果を図-3 に、板状生成物の定量化学分析結果を図-4 に示す。分析結果は、この部分が酸素・鉄・カルシウム・ナトリウム・硫黄・珪素を含むことを示すことから、板状の生成物は水酸化鉄  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$  ・グローベライト  $Na_2Ca(SO_4)_2 \cdot CSH$  ゲル  $3CaOSiO_2 \cdot 2H_2O$  などの混合物と考えられる。

写真-12 は写真-5 および 11 に示したのと同じ薄片内の別の部分の電子顕微鏡写真である。黄鉄鉱の内部に生じたひび割れを脈状の生成物が充填しているのが認められる。この部分の元素マッピング結果を図-5 に、充填物の定量化学分析結果を図-6 および 7 に示す。分析結果は、この部分が酸素および鉄を主体とし、周囲の黄鉄鉱本体と異なり硫黄をほとんど含まないことを示すことから、充填物は赤鉄鉱  $Fe_2O_3$  および水酸化鉄  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$  からなると考えられる。

写真-13 は写真-7 に示したのと同じ薄片内の電子顕微鏡によって泥岩粒とモルタルとの境界付近に認められた放射状の形態を示す物質

である。この物質の定量化学分析結果を図-8 に示す。分析結果は、この物質が酸素・カルシウム・硫黄・アルミニウムを含むことを示すことから、エトリンガイト  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  と考えられる。

写真-14 は写真-7 および 13 に示したのと同じ薄片内の泥岩粒中に認められたフランボイダルな黄鉄鉱粒子の電子顕微鏡写真である。この物質の定量化学分析結果を図-9 に示す。分析結果は、この物質が鉄および酸素を主体とし、珪素・カルシウム・アルミニウムを含むものの、硫黄を含まないことを示すことから、すでに水酸化鉄等に変質しているものと考えられる。

写真-15 は写真-9 に示した、黄鉄鉱粒と気泡が

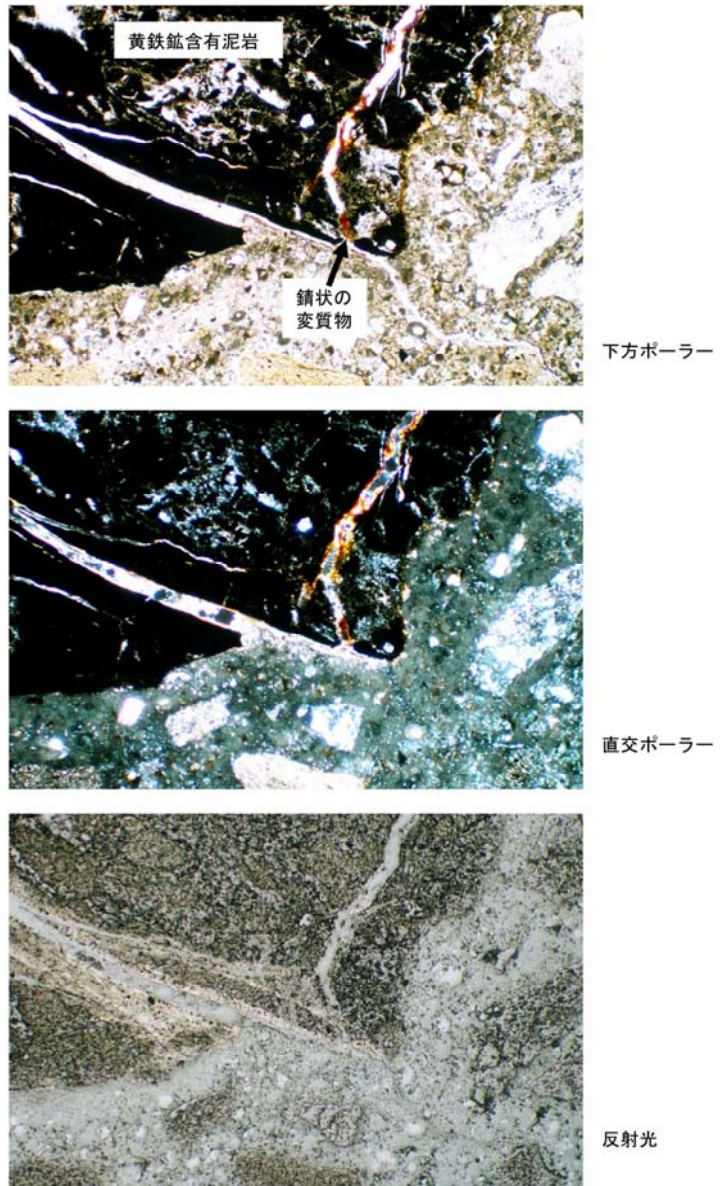


写真-7 黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（屋外曝露）の偏光顕微鏡写真（1）



接する部分の錆状変質物の電子顕微鏡写真で、針状の形態を示している。この錆状変質物の定量化学分析結果を図-10に示す。分析結果は、この部分が酸素・カルシウム・硫黄・鉄を含むことを示すことから、石膏  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  や水酸化鉄  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  などからなると考えられる。

以上の観察・分析結果から、黄鉄鉱がコンクリート中で変質する場合には、水酸化鉄  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ・グローベライト  $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{CSH}$  ゲル  $3\text{CaOSiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ・エトリンガイト  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  ・石膏  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  などが変質物として生じることが示された。ただし観察された変質物は少量であり、黄鉄鉱とコンクリートあるいはモルタルが激しく反応して劣化が急速に進行する様子は認められなかった。

#### 4. 6 考察

コンクリート試験体の曝露試験において、黄鉄鉱含有量が約6～7wt%のコンクリート試験体を除く大半の試験体では、曝露条件（屋外・室内）、骨材

の酸化処理の有無、試験体の中性化処理の有無にかかわらず、約7～11年の曝露期間を経過しても相対動弾性係数は試験開始時の90～100%あるいはそれ以上を保っており、急速に劣化する様子は見られない。また、これらの試験体は外観に亀裂、剥離等の劣化現象が認められなかったことから、表層を除く試験体内部は外部から水や空気が侵入しない条件を保っていたといえる。したがって、少なくとも黄鉄鉱含有量が5wt%以内であれば、外部から水や空気が侵入しない条件である限り、黄鉄鉱によるコンクリートの劣化はほとんど進行しないと考えられる。一方、黄鉄鉱含有量が約6～7wt%のコンクリート試験体の場合は、急速に低下する様子は现阶段では見られないものの、相対動弾性係数が70～80%程度とやや低いことから、今後の経過に注意が必要であると考えられる。

モルタル試験による曝露試験結果においては、黄鉄鉱含有の有無および含有量の違いにかかわらず、約6年の曝露期間を経過しても相対動弾性係数は試

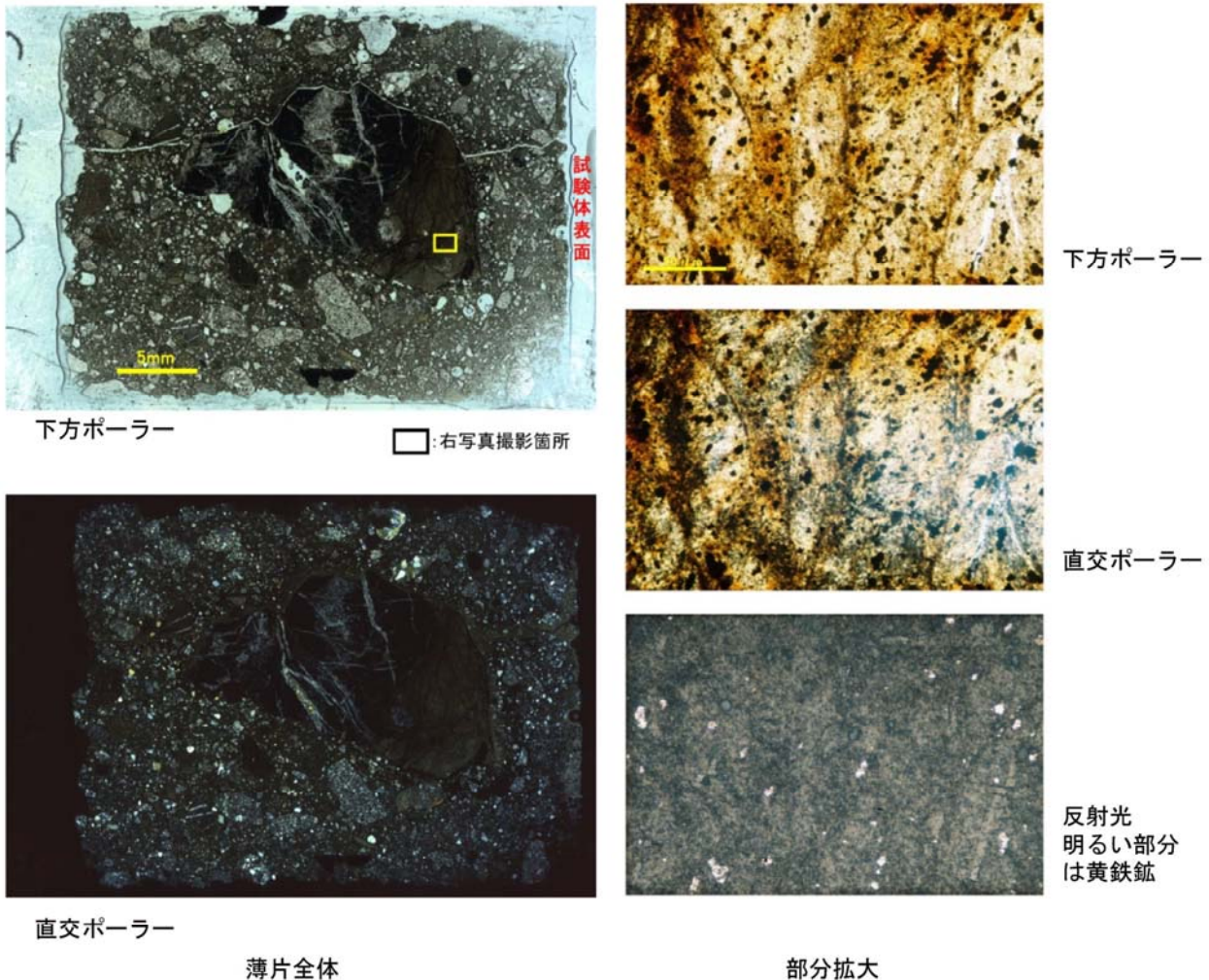
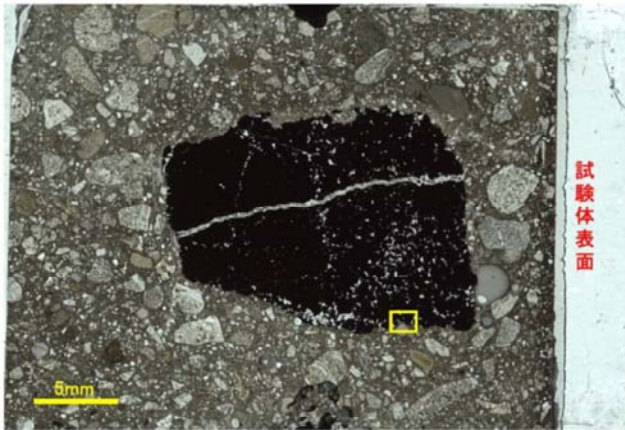


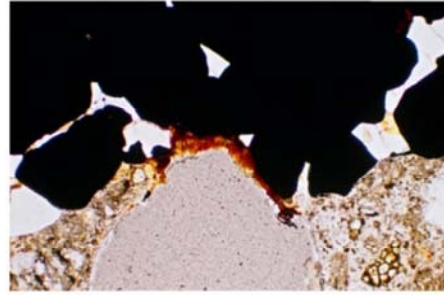
写真-8 黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（屋外曝露）の偏光顕微鏡写真（2）



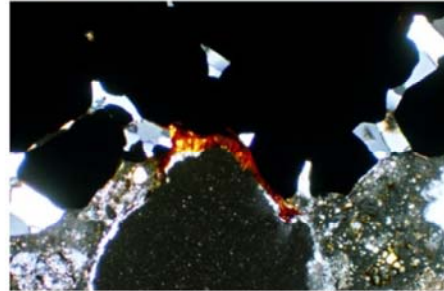
下方ポーラー

□: 右写真撮影箇所

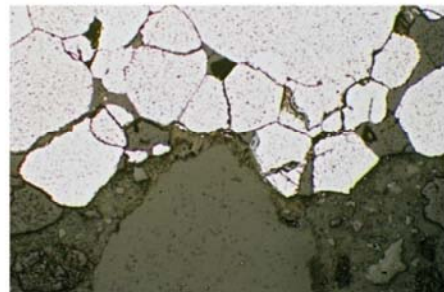
試料 PY-3-1 モルタルひび割れなし [300 μm]



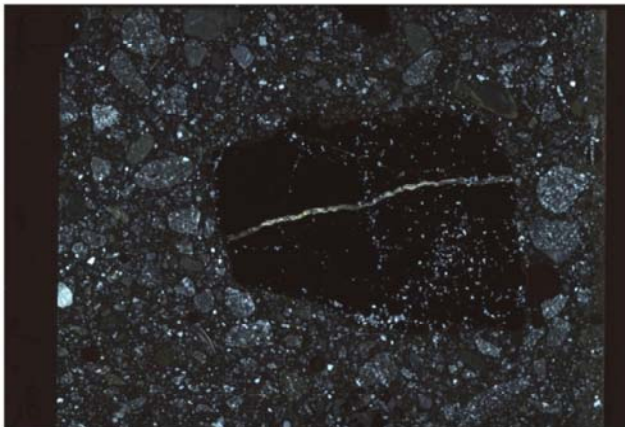
下方ポーラー



直交ポーラー



反射光

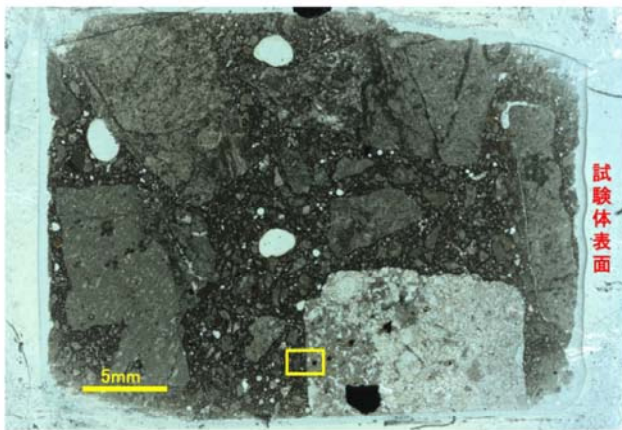


直交ポーラー

薄片全体

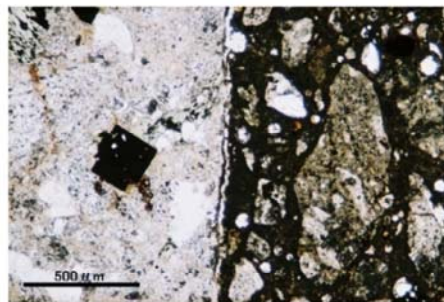
部分拡大

写真-9 黄鉄鉱粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（恒温槽内曝露）の偏光顕微鏡写真

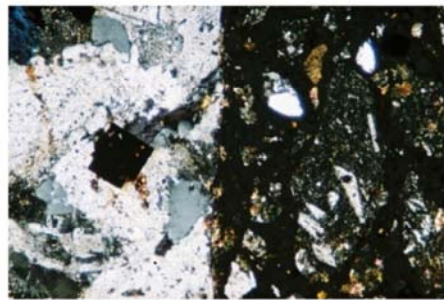


下方ポーラー

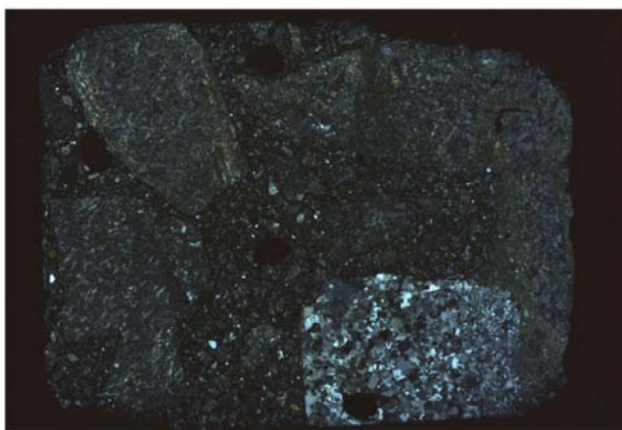
□: 右写真撮影箇所



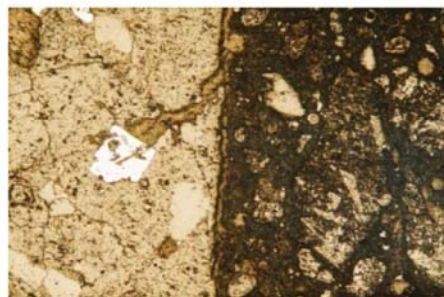
下方ポーラー



直交ポーラー



直交ポーラー



反射光

薄片全体

部分拡大

写真-10 黄鉄鉱含有骨材を用いたコンクリート曝露試験体（屋外曝露）の偏光顕微鏡写真

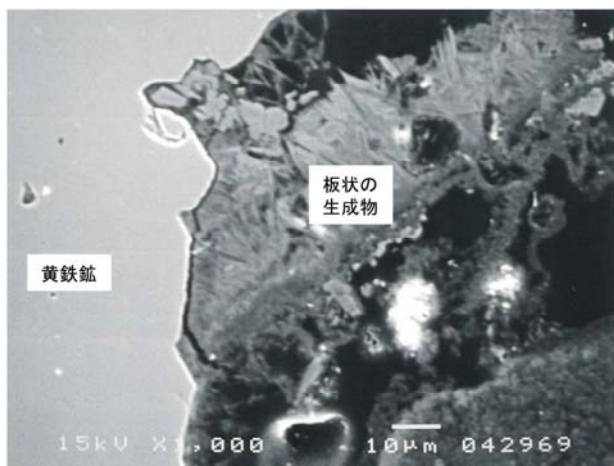


写真-11 黄鉄鉱粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（屋外曝露）の電子顕微鏡写真（1）

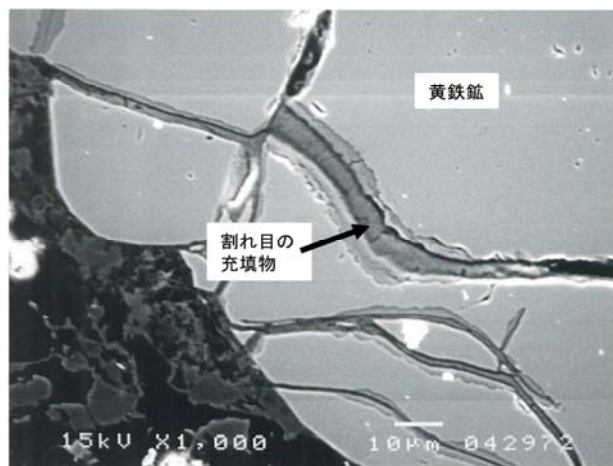


写真-12 黄鉄鉱粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（屋外曝露）の電子顕微鏡写真（2）

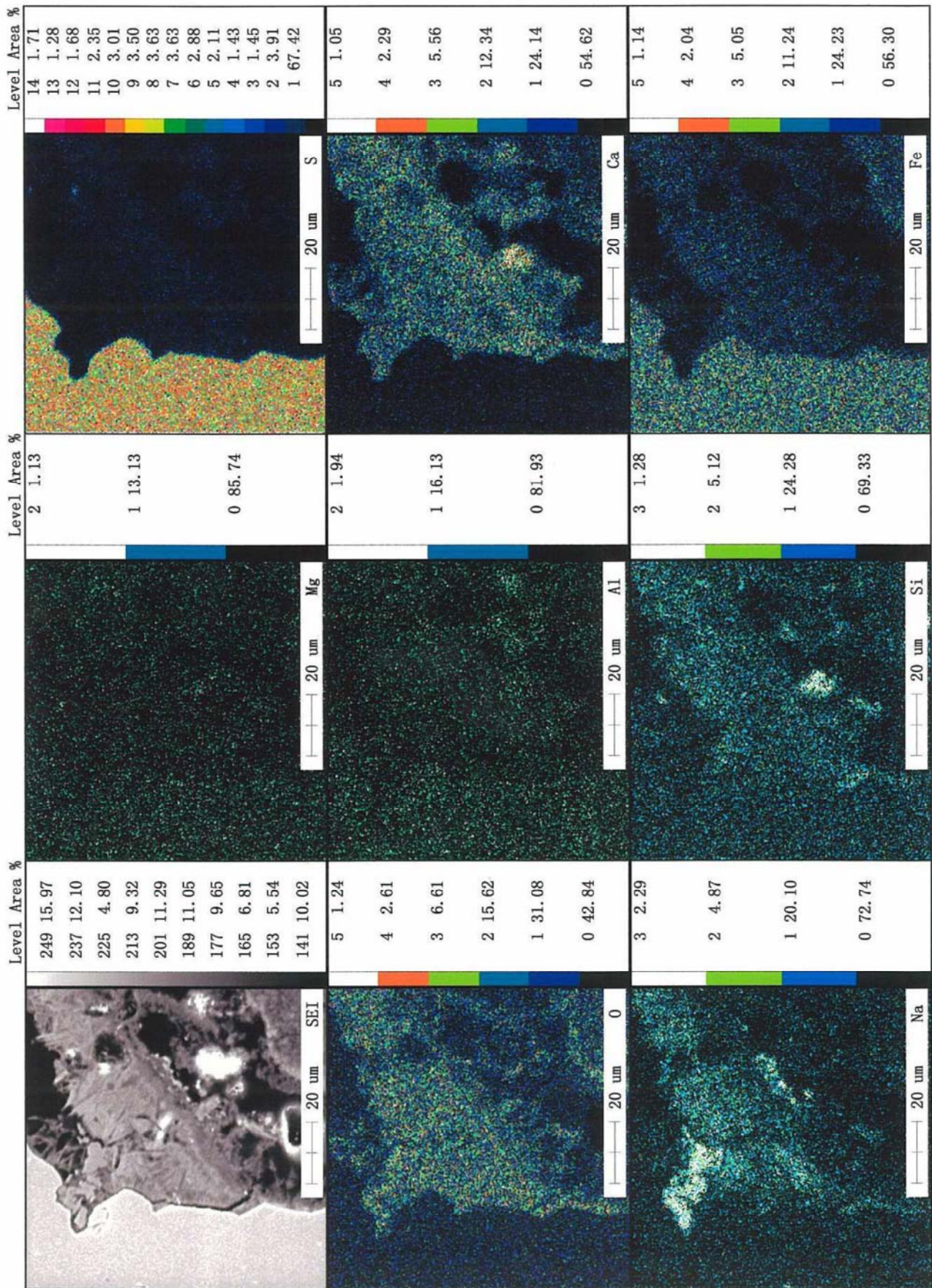
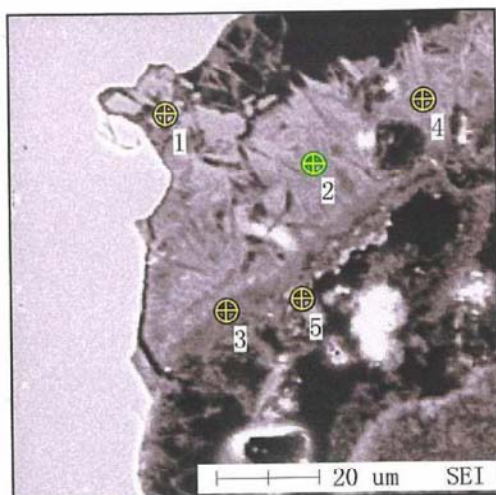


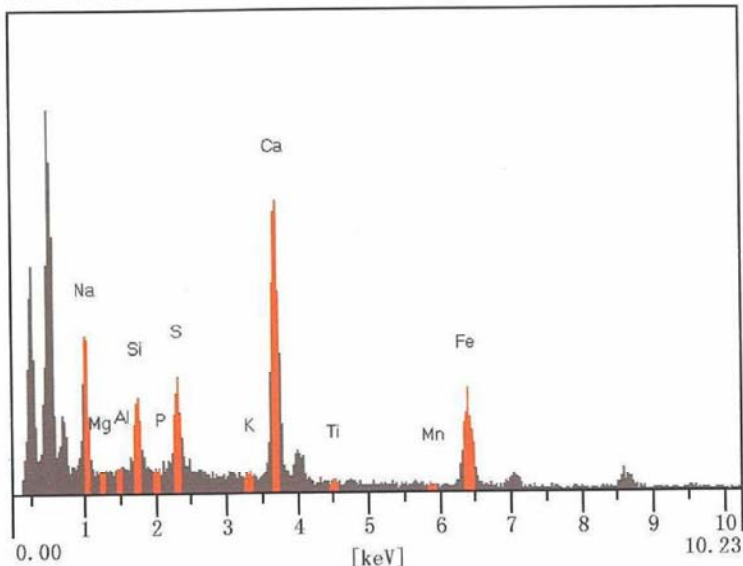
図-3 写真-11に示した板状の生成物の元素マッピング結果

試料名 : PY-3-6 [分析位置:2]  
 測定日時 : 2006年 2月27日 20時25分46秒



倍率 : 1000 倍

LIN 1K カウント



—— 測定 パラメータ ——

加速電圧	: 15.0 kV	照射電流	: 0.08 nA
経過時間	: 149.81 秒	デッドタイム	: 33 %
有効時間	: 100.00 秒	計数率	: 1343 カウント/秒
プリセット	: 有効時間 100 秒	測定方法	: 高分解能
エネルギー範囲	: 0 - 20 KeV		

—— システム ジオメトリ

X軸傾き角度	: 0.0 °
仰角	: 30.0 °
方位角度	: 220.0 °
入射角度	: 90.0 °
取り出し角度	: 30.0 °
検出器ずれ角度	: 0.0 °
検出器挿入距離	: 48.0 mm
作動距離	: 20.0 mm
検出器高さ	: 20.0 mm

検出器 パラメータ ——

Be 厚さ	: 0.00 μm
Al 厚さ	: 0.02 μm
C 厚さ	: 0.05 μm
有機層厚さ	: 0.00 μm
有機化合物	:
Au 層厚さ	: 0.01 μm
Si デッド層厚さ	: 0.15 μm
結晶角度	: 0.0 °
Mn K α 分解能	: 144.0 eV

—— 分析 結果 ——

元素	(keV)	重量%	誤差%	原子数%	化合物	重量%	Kレシオ	-Z-	-A-	-F-
O		26.98		56.54			化合物	0.931	3.700	1.000
Na_K	1.04	5.22	0.21	7.61	Na2O	7.04	0.0198	1.002	2.633	1.000
Mg_K	1.25	0.00	0.00	0.00	MgO	0.00	0.0000	0.979	2.021	0.999
Al_K	1.49	0.23	0.02	0.28	Al2O3	0.43	0.0014	1.010	1.601	0.998
Si_K	1.74	2.20	0.10	2.63	SiO2	4.70	0.0167	0.982	1.343	0.997
P_K	2.01	0.06	0.01	0.07	P2O5	0.15	0.0005	1.016	1.231	0.995
S_K	2.31	3.31	0.14	3.46	SO3	8.27	0.0296	0.991	1.136	0.993
K_K	3.31	0.29	0.03	0.25	K2O	0.35	0.0029	1.032	1.033	0.964
Ca_K	3.69	17.59	0.45	14.72	CaO	24.61	0.1733	1.009	1.016	0.990
Ti_K	4.51	0.25	0.03	0.18	TiO2	0.42	0.0022	1.106	1.045	0.980
Mn_K	5.90	0.31	0.04	0.19	MnO	0.40	0.0027	1.133	1.013	0.992
Fe_K	6.40	23.44	0.95	14.07	Fe2O3	33.51	0.2089	1.114	1.007	1.000
合計		79.88		100.00		79.88				

図-4 写真-11に示した板状の生成物の定量化学分析結果

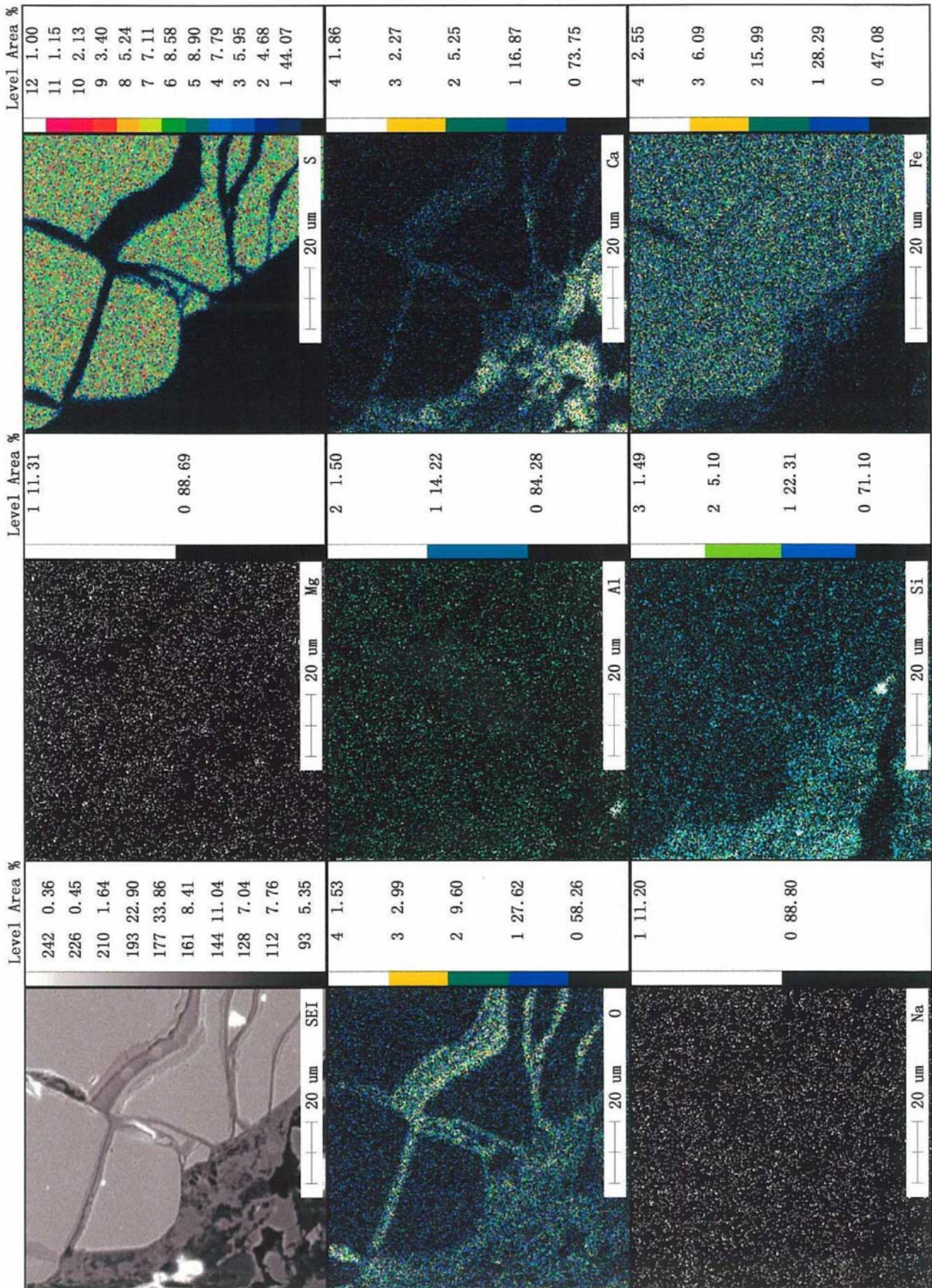
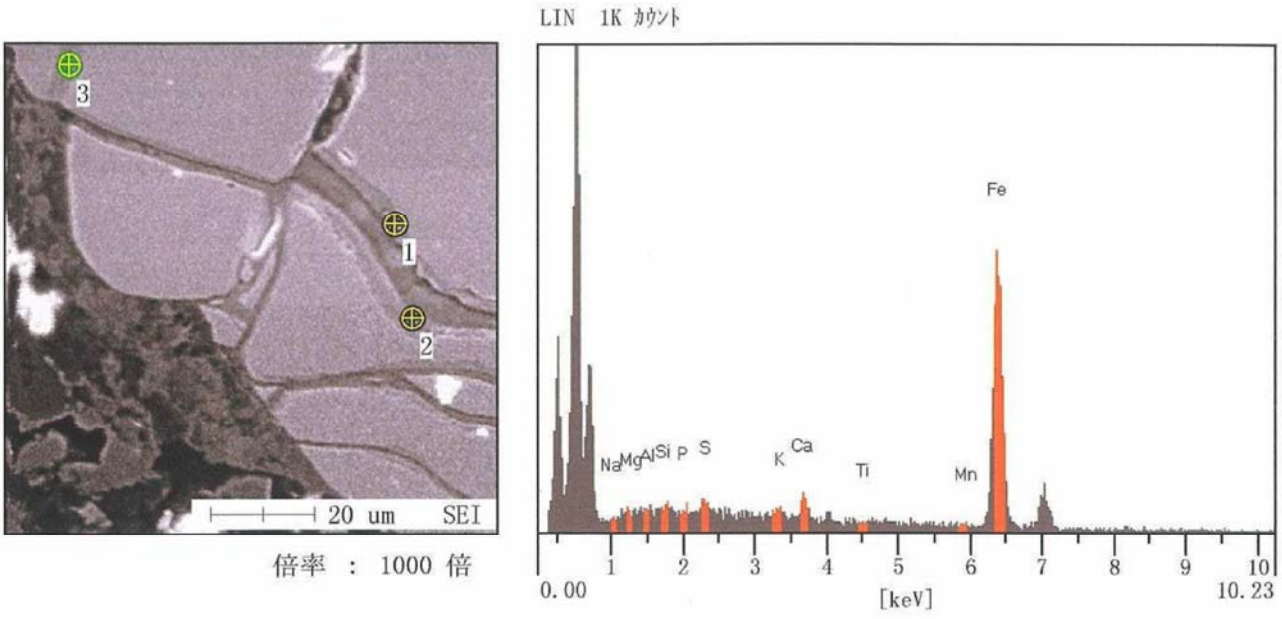


図-5 写真-12に示した割れ目の充填物の元素マッピング結果

試料名 : PY-3-6 [分析位置:3]  
 測定日時 : 2006年 2月28日 17時10分11秒



倍率 : 1000 倍

—— 測定 パラメータ ——

加速電圧	: 15.0 kV	照射電流	: 0.08 nA
経過時間	: 147.38 秒	デッドタイム	: 32 %
有効時間	: 100.00 秒	計数率	: 1171 カウント/秒
プリセット	: 有効時間 100 秒	測定方法	: 高分解能
エネルギー範囲	: 0 - 20 KeV		

—— システム ジオメトリ

X軸傾き角度	: 0.0 °
仰角	: 30.0 °
方位角度	: 220.0 °
入射角度	: 90.0 °
取り出し角度	: 30.0 °
検出器ずれ角度	: 0.0 °
検出器挿入距離	: 48.0 mm
作動距離	: 20.0 mm
検出器高さ	: 20.0 mm

検出器 パラメータ ——

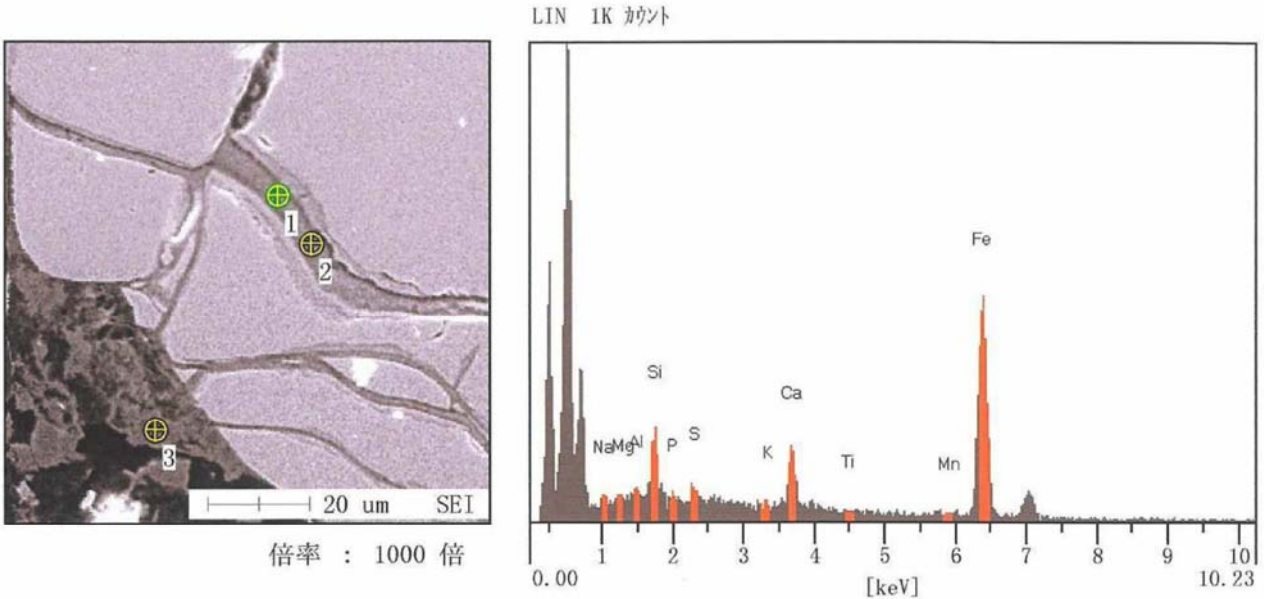
Be 厚さ	: 0.00 μm
Al 厚さ	: 0.02 μm
C 厚さ	: 0.05 μm
有機層厚さ	: 0.00 μm
有機化合物	:
Au 層厚さ	: 0.01 μm
Si デッド層厚さ	: 0.15 μm
結晶角度	: 0.0 °
Mn K α 分解能	: 144.0 eV

—— 分析 結果 ——

元素	(keV)	重量%	誤差%	原子数%	化合物	重量%	Kレシオ	-Z-	-A-	-F-
O		29.58		60.07				0.900	1.921	1.000
Na_K	1.04	0.00	0.00	0.00	Na2O	0.00	0.0000	0.970	4.476	1.000
Mg_K	1.25	0.00	0.00	0.00	MgO	0.00	0.0000	0.947	2.891	1.000
Al_K	1.49	0.06	0.01	0.07	Al2O3	0.11	0.0003	0.977	2.108	1.000
Si_K	1.74	0.06	0.00	0.06	SiO2	0.12	0.0004	0.950	1.648	0.999
P_K	2.01	0.18	0.02	0.19	P2O5	0.42	0.0013	0.983	1.408	0.998
S_K	2.31	0.50	0.04	0.50	SO3	1.24	0.0041	0.959	1.254	0.997
K_K	3.31	0.40	0.03	0.33	K2O	0.48	0.0039	0.997	1.064	0.982
Ca_K	3.69	1.32	0.09	1.07	CaO	1.85	0.0134	0.975	1.039	0.972
Ti_K	4.51	0.15	0.02	0.10	TiO2	0.25	0.0015	1.067	1.016	0.924
Mn_K	5.90	0.00	0.00	0.00	MnO	0.00	0.0000	1.091	1.000	0.965
Fe_K	6.40	64.62	1.54	37.60	Fe2O3	92.39	0.6050	1.072	0.997	1.000
合計		96.87		100.00		96.87				

図-6 写真-1 2 に示した割れ目の充填物の定量化学分析結果 (1)

試料名 : PY-3-6 [分析位置:1]  
 測定日時 : 2006年 2月28日 15時38分 9秒



倍率 : 1000 倍

---- 測定 パラメータ ----

加速電圧	: 15.0 kV	照射電流	: 0.08 nA
経過時間	: 150.01 秒	デッドタイム	: 33 %
有効時間	: 100.00 秒	計数率	: 1214 カウント/秒
プリセット	: 有効時間 0 秒	測定方法	: 高分解能
エネルギー範囲	: 0 - 20 KeV		

---- システム ジオメトリ

X軸傾き角度	: 0.0 °
仰角	: 30.0 °
方位角度	: 220.0 °
入射角度	: 90.0 °
取り出し角度	: 30.0 °
検出器ずれ角度	: 0.0 °
検出器挿入距離	: 48.0 mm
作動距離	: 20.0 mm
検出器高さ	: 20.0 mm

検出器 パラメータ ----

Be 厚さ	: 0.00 μm
Al 厚さ	: 0.02 μm
C 厚さ	: 0.05 μm
有機層厚さ	: 0.00 μm
有機化合物	:
Au 層厚さ	: 0.01 μm
Si デッド層厚さ	: 0.15 μm
結晶角度	: 0.0 °
Mn K α 分解能	: 144.0 eV

---- 分析 結果 ----

元素	(keV)	重量%	誤差%	原子数%	化合物	重量%	Kレシオ	-Z-	-A-	-F-
O		26.98		59.70				0.908	1.990	1.000
Na_K	1.04	0.84	0.07	1.30	Na2O	1.14	0.0024	0.978	3.581	1.000
Mg_K	1.25	0.00	0.00	0.00	MgO	0.00	0.0000	0.955	2.441	1.000
Al_K	1.49	0.30	0.02	0.39	Al2O3	0.57	0.0017	0.985	1.850	0.999
Si_K	1.74	2.31	0.11	2.92	SiO2	4.95	0.0161	0.958	1.497	0.999
P_K	2.01	0.10	0.01	0.12	P2O5	0.24	0.0008	0.991	1.335	0.998
S_K	2.31	0.48	0.03	0.53	SO3	1.20	0.0041	0.967	1.206	0.997
K_K	3.31	0.24	0.02	0.21	K2O	0.28	0.0023	1.006	1.048	0.981
Ca_K	3.69	3.63	0.18	3.21	CaO	5.08	0.0368	0.983	1.026	0.977
Ti_K	4.51	0.00	0.00	0.00	TiO2	0.00	0.0000	1.077	1.015	0.939
Mn_K	5.90	0.00	0.00	0.00	MnO	0.00	0.0000	1.101	1.000	0.972
Fe_K	6.40	49.88	1.32	31.62	Fe2O3	71.32	0.4624	1.082	0.997	1.000
合計		84.77		100.00		84.77				

図-7 写真-12に示した割れ目の充填物の定量化学分析結果(2)



験開始時の 80~100%程度を保っており、急速に低下する様子は現段階では見られない。この結果は先に述べた考えを支持すると考えられる。

偏光顕微鏡観察および電子顕微鏡観察・分析の結果では、割れ目や気泡などの箇所に変質物が少量生じているものの、黄鉄鉱とコンクリートあるいはモルタルが激しく反応して変質物が多量に生成している様子は認められなかったことから、これも外部から水や空気が侵入しない条件下では黄鉄鉱によるコンクリートの劣化はほとんど進行しないという考えと矛盾しない。

黄鉄鉱粒ないし黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル試験体において、屋外曝露を行ったすべての試験体において打ち継ぎ目の位置に水平方向の割れ目が生じたが、顕微鏡観察では、変質物の生成は少量で、多量の変質物が割れ目を押し広げた様子は認められなかったことから、割れ目の成因は別にあると考えられる。恒温槽内の曝露試験体（温度一定）でこのような割れ目が生じていないことと併せ、割れ目が生じた原因は試験体の収縮により弱線である打ち継ぎ目の位置がひび割れたものと考えられる。なお、割れ目が生じて水や空気の侵入が可能になったにもかかわらず変質物の生成が少量であった理由にははっきりしないが、割れ目が水平であったために水が侵入しにくかった可能性が考えられる。また、割れ目が生じたにもかかわらず変質物の生成が少量であったことは、割れ目が生じず水や空気が侵入しない条件下では黄鉄鉱によるコンクリートの劣化はほとんど進行しないという考えを支持すると考えられる。これは割れ目の生じていない恒温槽内の曝露試験体の顕微鏡観察において黄鉄鉱粒と気泡が接する部分を除き、黄鉄鉱粒の周囲全体にわたって変質物が生じている様子が認められず、黄鉄鉱自体も変質していないことによっても支持される。

以上のことから、少なくとも黄鉄鉱含有量が 5 wt%以内であれば、外部から水や空気が侵入しない条件である限り、黄鉄鉱粒と気泡が接する部分などで少量の変質物が生じることはあるものの、黄鉄鉱によるコンクリートの劣化はほとんど進行しないと考えられ、ダム内部コンクリートのような条件下での使用は可能と考えられる。

## 5. まとめ

コンクリートの様々な品質を低下させる有害鉱物のうち黄鉄鉱について、曝露試験体を作製して曝露試



写真-13 黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（屋外曝露）の電子顕微鏡観察で見られた放射状物質

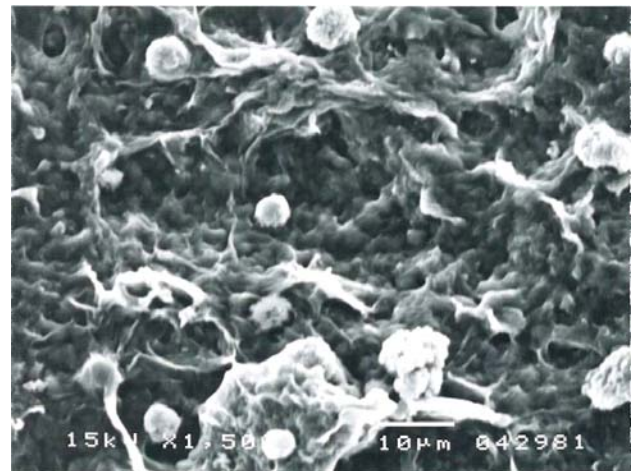


写真-14 黄鉄鉱含有泥岩粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（屋外曝露）の電子顕微鏡観察で見られたフランボイダルな黄鉄鉱微粒子

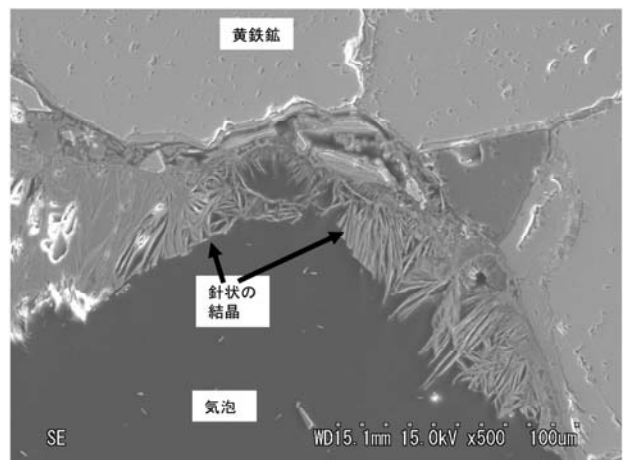
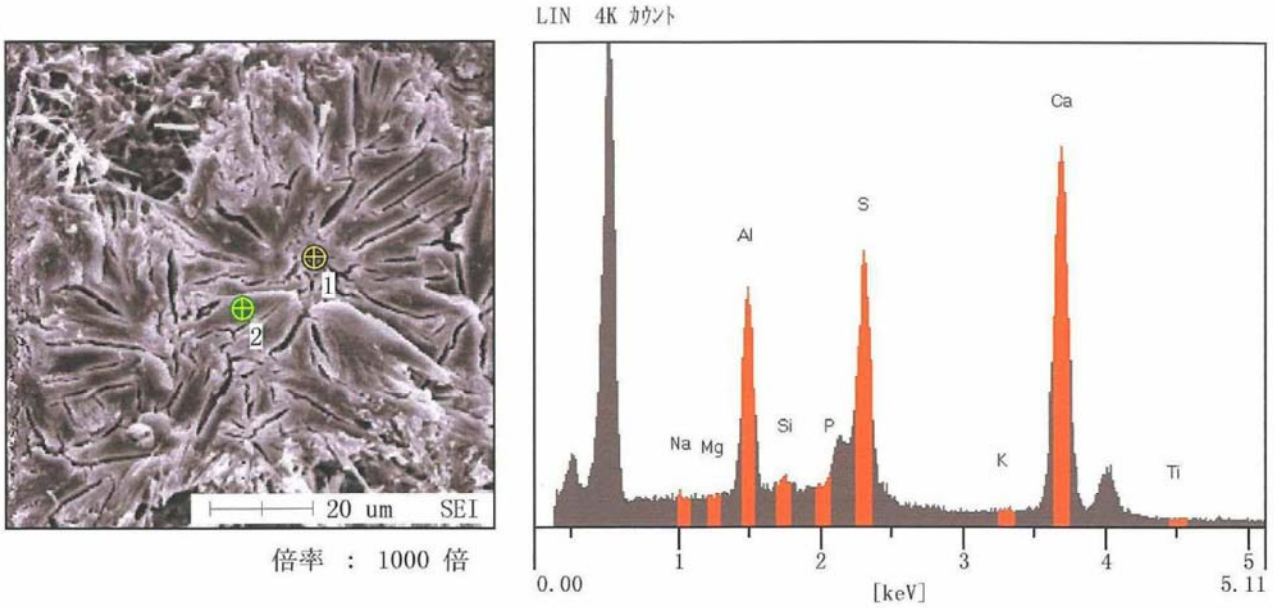


写真-15 黄鉄鉱粒を埋め込んだモルタル曝露試験体（恒温槽内曝露）の電子顕微鏡観察で見られた針状の生成物

試料名 : GF-3-4 [分析位置:2]  
 測定日時 : 2006年 2月28日 18時53分50秒



--- 測定 パラメータ ---

加速電圧	: 15.0 kV	照射電流	: 0.08 nA
経過時間	: 221.43 秒	デッドタイム	: 54 %
有効時間	: 100.00 秒	計数率	: 2447 カウント/秒
プリセット	: 有効時間 100 秒	測定方法	: 高分解能
エネルギー範囲	: 0 - 20 KeV		

--- システム ジオメトリ ---

X軸傾き角度	: 0.0 °
仰角	: 30.0 °
方位角度	: 220.0 °
入射角度	: 90.0 °
取り出し角度	: 30.0 °
検出器ずれ角度	: 0.0 °
検出器挿入距離	: 48.0 mm
作動距離	: 20.0 mm
検出器高さ	: 20.0 mm

--- 検出器 パラメータ ---

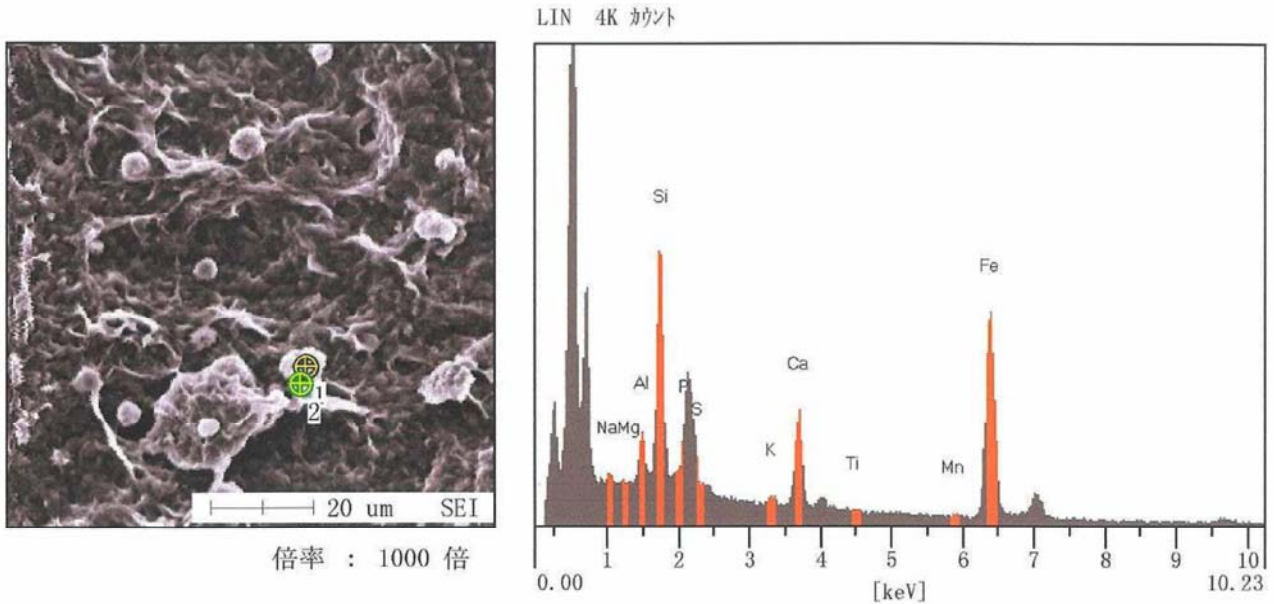
Be 厚さ	: 0.00 μm
Al 厚さ	: 0.02 μm
C 厚さ	: 0.05 μm
有機層厚さ	: 0.00 μm
有機化合物	:
Au 層厚さ	: 0.01 μm
Si デッド層厚さ	: 0.15 μm
結晶角度	: 0.0 °
Mn Kα 分解能	: 144.0 eV

--- 分析 結果 ---

元素	(keV)	重量%	誤差%	原子数%	化合物	重量%	Kレシオ	-Z-	-A-	-F-
O		42.81		61.94			化合物	0.960	7.581	1.000
Na_K	1.04	0.00	0.00	0.00	Na2O	0.00	0.0000	1.032	2.391	0.998
Mg_K	1.25	0.30	0.01	0.29	MgO	0.50	0.0017	1.008	1.746	0.996
Al_K	1.49	9.92	0.15	8.51	Al2O3	18.75	0.0666	1.037	1.443	0.996
Si_K	1.74	0.98	0.03	0.81	SiO2	2.10	0.0063	0.942	1.670	0.995
P_K	2.01	0.00	0.00	0.00	P2O5	0.00	0.0000	0.976	1.456	0.991
S_K	2.31	13.14	0.18	9.49	SO3	32.82	0.1076	0.958	1.285	0.993
K_K	3.31	0.54	0.03	0.32	K2O	0.65	0.0046	0.971	1.233	0.977
Ca_K	3.69	32.15	0.36	18.57	CaO	44.99	0.2885	0.956	1.166	1.000
Ti_K	4.51	0.00	0.00	0.00	TiO2	0.00	0.0000	1.009	1.370	1.000
Mn_K	5.90	0.15	0.01	0.06	MnO	0.19	0.0012	1.064	1.148	1.000
Fe_K	6.40	0.00	0.00	0.00	Fe2O3	0.00	0.0000	1.055	1.108	1.000
合計		100.00		100.00		100.00				

図-8 写真-13に示した放射状物質の定量化学分析結果

試料名 : GF-3-4 [分析位置:2]  
 測定日時 : 2006年 2月28日 19時51分11秒



---- 測定 パラメータ ----

加速電圧	: 15.0 kV	照射電流	: 0.08 nA
経過時間	: 259.41 秒	デッドタイム	: 61 %
有効時間	: 100.00 秒	計数率	: 2659 カウント/秒
プリセット	: 有効時間 100 秒	測定方法	: 高分解能
エネルギー範囲	: 0 - 20 KeV		

---- システム ジオメトリ

X軸傾き角度	: 0.0 °
仰角	: 30.0 °
方位角度	: 220.0 °
入射角度	: 90.0 °
取り出し角度	: 30.0 °
検出器ずれ角度	: 0.0 °
検出器挿入距離	: 48.0 mm
作動距離	: 20.0 mm
検出器高さ	: 20.0 mm

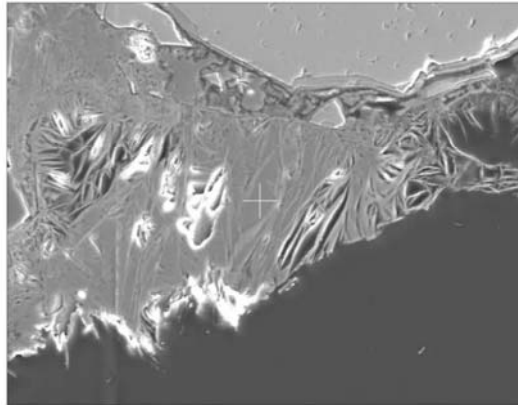
検出器 パラメータ ----

Be 厚さ	: 0.00 μm
Al 厚さ	: 0.02 μm
C 厚さ	: 0.05 μm
有機層厚さ	: 0.00 μm
有機化合物	:
Au 層厚さ	: 0.01 μm
Si デッド層厚さ	: 0.15 μm
結晶角度	: 0.0 °
Mn K α 分解能	: 144.0 eV

---- 分析 結果 ----

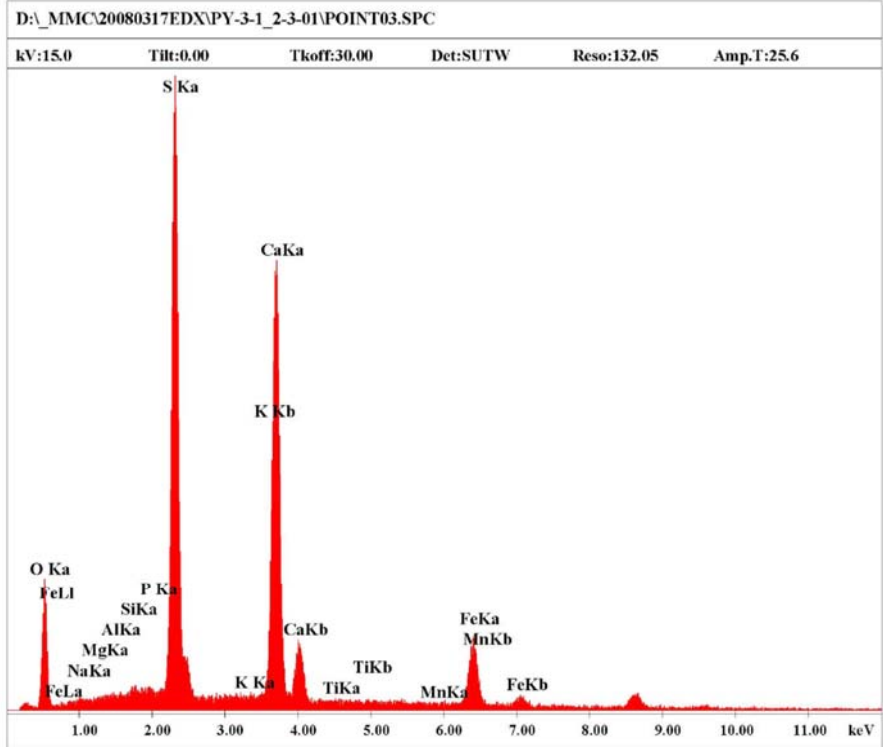
元素	(keV)	重量%	誤差%	原子数%	化合物	重量%	Kレシオ	-Z-	-A-	-F-
O		35.70		60.34	化合物			0.925	2.918	1.000
Na_K	1.04	0.65	0.02	0.76	Na2O	0.87	0.0018	0.996	3.603	0.999
Mg_K	1.25	0.54	0.02	0.60	MgO	0.90	0.0023	0.967	2.480	0.998
Al_K	1.49	2.76	0.06	2.77	Al2O3	5.22	0.0147	0.993	1.903	0.998
Si_K	1.74	9.94	0.14	9.57	SiO2	21.26	0.0635	0.946	1.655	0.999
P_K	2.01	0.00	0.00	0.00	P2O5	0.00	0.0000	0.931	1.806	0.999
S_K	2.31	0.00	0.00	0.00	SO3	0.00	0.0000	0.915	1.518	0.998
K_K	3.31	0.56	0.02	0.39	K2O	0.67	0.0051	0.971	1.154	0.987
Ca_K	3.69	7.46	0.15	5.04	CaO	10.44	0.0714	0.953	1.109	0.989
Ti_K	4.51	0.14	0.01	0.08	TiO2	0.24	0.0013	1.036	1.117	0.979
Mn_K	5.90	0.00	0.00	0.00	MnO	0.00	0.0000	1.079	1.043	0.991
Fe_K	6.40	42.24	0.57	20.45	Fe2O3	60.40	0.3849	1.066	1.030	1.000
合計		100.00		100.00		100.00				

図-9 写真-14に示したフランボイダルな黄鉄鉱微粒子の定量化学分析結果



Matrix: 1024x800  
 Data Type: SE(ADC)  
 Magnification: 800x  
 ImageSize: 0.1604x0.1253mm  
 kV: 15.0  
 Tilt: 0

SE 20um



EDAX Elem	ZAF Wt%	Quantifica (Standardless)			A	F
		At%	K-Ratio	Z		
O	19.4	37.07	0.0339	1.0744	0.1627	1.0004
NaK	0.29	0.38	0.001	1.0018	0.3516	1.0014
MgK	0.11	0.14	0.0006	1.0258	0.4951	1.0029
AlK	0.1	0.11	0.0006	0.9974	0.6351	1.006
SiK	0.32	0.35	0.0025	1.0278	0.7513	1.0115
P	0.14	0.14	0.0012	0.9907	0.8367	1.0213
S	26.29	25.07	0.2417	1.0135	0.8978	1.0104
K	0.37	0.29	0.0033	0.9706	0.9075	1.0406
CaK	34.38	26.23	0.3206	0.9918	0.9359	1.0046
TiK	0.3	0.19	0.0025	0.9037	0.9031	1.0087
MnK	0.4	0.22	0.0034	0.8815	0.9616	1
FeK	17.91	9.81	0.1562	0.8969	0.9725	1
Total	100	100				

図-10 写真-15に示した針状の生成物の定量化学分析結果

験を行うとともに、曝露を行った試験体の偏光顕微鏡による観察、電子顕微鏡による観察および化学分析を行い、劣化機構および劣化の抑制手法について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

1) 黄鉄鉱を含有する骨材を使用して、様々な黄鉄鉱含有量に調整したコンクリート試験体およびモルタル試験体を作製し、屋外および屋内において曝露試験を行い、定期的に一次共鳴振動数の測定および外観の観察を行った。その結果、黄鉄鉱含有量が約6～7%のコンクリート試験体では相対動弾性係数が試験開始時の70～80%程度のもが見られるが、その他の試験体ではそれ以上の値を保っている。また、いずれの試験体においても相対動弾性係数が急速に低下する様子は現段階では見られないとともに、曝露条件（屋外・室内）、骨材の酸化処理の有無、試験体の中性化処理の有無による差は明確でなかった。また、いずれの試験体においても外観に亀裂、剥離等の劣化現象は認められなかった。

2) 曝露試験を行った試験体の偏光顕微鏡観察、電子顕微鏡観察および分析では、黄鉄鉱がコンクリート中で変質する場合には、水酸化鉄・グローベライト・エトリンガイト・石膏などが変質物として生じることが示されたが、観察された変質物は少量であり、黄鉄鉱とコンクリートあるいはモルタルが激しく反応して劣化が急速に進行する様子は認められなかった。

3) したがって、少なくとも黄鉄鉱含有量が5%以内であれば、外部から水や空気が侵入しない条件である限り、黄鉄鉱粒と気泡が接する部分などで少量の変質物が生じることはあるものの、黄鉄鉱によるコンクリートの劣化はほとんど進行しないと考えられ、ダム内部コンクリートのような条件下での使用は可能と考えられる。

## 参考文献

- 1) 耐久性診断研究委員会:「コンクリート構造物の耐久性診断・評価方法に関するJCI基準案(その3)骨材に含まれる有害鉱物の判別(同定)方法(案)」、コンクリート工学、第26巻第7号、pp.125-137、1988年7月
- 2) 田村博:「骨材とコンクリート構造物の耐久性—有害な含有鉱物の影響」、材料、第459号、pp.87-93、1991年11月
- 3) 川村満紀:「骨材とコンクリート構造物の耐久性—有害不純物の影響」、材料、第458号、pp.96-101、1991年

10月

- 4) 丸章夫・柳田力:「岩石鉱物学・地質学的にみた骨材の選択」、コンクリート工学、第19巻第11号、pp.85-89、1981年11月



## 【英文要旨】

A study on specific rocks containing harmful mineral for effective utilization of as a dam concrete aggregate

This study examined mechanism and control method of deterioration of concrete caused by pyrite, which is one of the harmful mineral which causes quality of concrete to decline. Exposure tests on mortar and concrete using aggregate that contains pyrite, observation using a polarizing microscope and observation and chemical analysis using a scanning electron microscope were conducted.

The result of the exposure tests is that in almost all samples, the relative dynamic modulus of elasticity remained at 90-100% of the initial value, and there is no evidence of dramatic decrease. The other samples showed the same trend, and no clear differences have yet appeared, regardless of whether exposure condition (indoor/outdoor), whether or not the aggregate had been oxidization-treated, and whether or not the samples had been neutralized. In addition, no outward signs of deterioration, such as fissuring, lamination, etc., have ever appeared in any of the samples.

The result of the observation and chemical analysis is that in case of deterioration of pyrite in concrete, reactive components such as ferrous hydroxide, glauberite, ettringite, gypsum, etc. are produced. However, an amount of these reactive components is very small, and no signs of rapid deterioration caused by intense reaction of pyrite and concrete or mortar were appeared in any of the samples.

The result of these examinations is as follows: in case that the content of pyrite in concrete is within 5wt%, pyrite-induced deterioration of concrete hardly progress under the condition that no water and air intrude from outside like interior concrete of dam.

Keyword: harmful mineral, pyrite, exposure test, polarizing microscope, electron microscope