

[38] 非構造的ひびわれを生じたコンクリートの劣化原因に関する 鉱物化学的検討

正会員○藤原 靖（大成建設技術研究所）
 正会員 松岡康訓（大成建設技術研究所）
 正会員 金子誠二（大成建設技術研究所）
 正会員 内藤隆史（大成建設技術研究所）

1. はじめに

最近、塩害やアルカリ骨材反応といった非構造的な要因によるコンクリート構造物の劣化が社会的問題となっている。これらの劣化は材料的な要素、施工的な要素、立地条件等の環境的要素などを反映したものである。特にアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化には、骨材に対する鉱物学的な認識の不足、セメントのアルカリ量など材料的な問題に負うところが大きい。したがって使用材料の正確かつ迅速な品質試験方法の確立、事前防止・抑制材料の開発、適切な補修材料の開発が期待される。

本報告は以上の問題を検討するにあたり、実際に類似の劣化を生じている4構造物について、その劣化原因を調査し、コンクリートについて鉱物化学的に検討したので結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 調査と試料採取：コンクリートのひび割れ状態について観察を行なった。試料の採取はプレイカーによる研りおよびボーリングカッター（φ 100mm）によった。

2.2 ひび割れの原因についての検討：コンクリートを手で研り、目視で劣化状態の観察を行なった。代表的な粗骨材部分やモルタル部分について走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し、X線マイクロアナライザー（XMA）で化学組成を検討し、X線回折（XRD）で生成物の同定を行なった。

2.3 粗骨材の鉱物組成の検討：アルカリ骨材反応によるひび割れと考えられるコンクリートについては、粗骨材の鉱物組成をXRDならびに薄片の偏光顕微鏡による観察により検討した。

2.4 コンクリートの塩分含有量の検討：コンクリートの塩分含有量とアルカリ骨材反応との関係について検討した。塩分の分析は、日本コンクリート工学協会—硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法¹⁾によった。

2.5 エトリンガイト生成についての検討：イオウ含有量について分析し、エトリンガイト生成の原因について検討した。

3. 結果と考察

3.1 コンクリートのひび割れ状態

試料を採取した構造物は表-1に示した打設後9年ないし16年経過した4つの土木構造物である。A、D構造物は河川中に位置し、B、C構造物は海岸に位置している。図-1にコンクリートのひび割れの様子を示した。いずれも網目状の不規則なひび割れが生じており、そのひび割れ幅はおよそ0.5～5.0mm

表-1 構造物の概要

構造物名	A	B	C	D
種類	橋脚	栈橋	擁壁	橋脚
立地	河川	海岸	海岸	河川
打設後経過年数	10年	9年	16年	12年

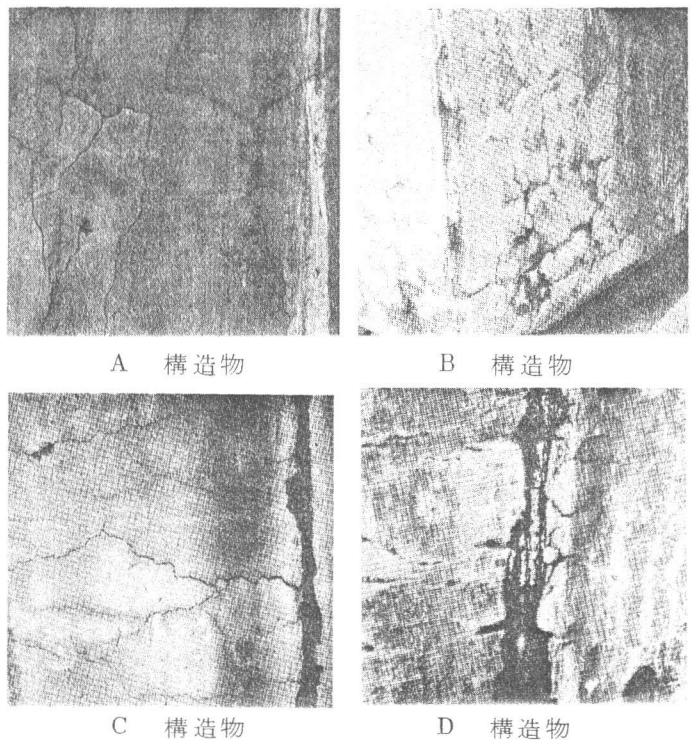


図-1 構造物のひび割れ状態

である。コンクリートの面が一様に汚れているのが特徴的であり、A, B, Cコンクリートはひび割れ部分が赤褐色で、Dコンクリートは白色であった。

コンクリートの状態はA, Bコンクリートは手で容易に研れる程もろく、C, Dコンクリートは硬い状態を保持していた。

3.2 ひび割れの原因について

コンクリートのひび割れ面について観察すると、A, B, C構造物のコンクリートは図-2に示したように粗骨材が破断しており、その骨材には明瞭な反応環がみられる。この粗骨材をSEMで観察すると図-3に示したように、アルカリシリカ反応生成物がみられ、化学成分はNa > Ca > Kの順であるケイ酸塩と考えられる。これらの生成物の形態は既往の報告と一致していた。²⁾

一方D構造物のコンクリートは粗骨材は破断しておらず、粗骨材とモルタル部分の境界にひび割れが生じている。またその境界面を中心に白色の物質が多量に生成している。白色の物質は図-3に示したSEM写真のとおり針状形態であり、XMAによる化学成分分析ではカルシウム、アルミニウム、イオウのみが検出され、そのモル比は6:1.5:2.4であり、エトリンガイトの6:

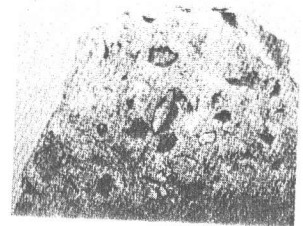
1:3に近い値になっている。X線回折の結果は図-4に示したように、9.73Åと5.61Åに明瞭なピークがみとめられる。したがって白色の物質はエトリンガイトとモノサルフェートである。

以上からA, B, C構造物コンクリートのひび割れはアルカリ骨材反応、D構造物コンクリートの場合はエトリンガイトの生成によりひき起こされたものと考えられる。

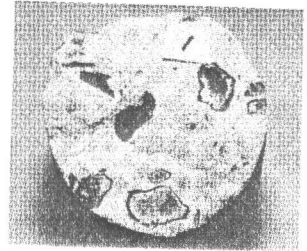
3.3 粗骨材の鉱物組成について

A, B, Cコンクリート中の粗骨材の鉱物組成について検討を行なった。図-5にX線回折結果を示している。A粗骨材とC粗骨材は雲母族、クロライト、石英、斜長石の明瞭なピークがみとめられる。B粗骨材は斜長石の強いピークとアルカリ骨材反応を生じるとされているクリストバライトのピークがみられる。

表-2に粗骨材の岩石薄片の偏光顕微鏡による観察結果を示した。A, B粗骨材は輝石安山岩を含んでおり、石基には反応性鉱物と考えられているガラスがみとめられる。C粗骨材は黒色粘板岩と角礫岩とからなっている。前者は石英、長石、方解石、絹雲母からなり、後者はシルト、細粒砂岩の間隙を石英、方解石、緑泥石、絹雲母、黄鉄鉱が充填している。これらの鉱物は熱水性のものとみられるが、明らかにアルカリ骨材反応を生じると考えられる鉱物の存在は不明であった。しかし黒色粘板岩の石英、斜長石は基質に多く存在し、粒径が0.1mm~0.05mmの破砕片であることから、反応性があることが予想される。

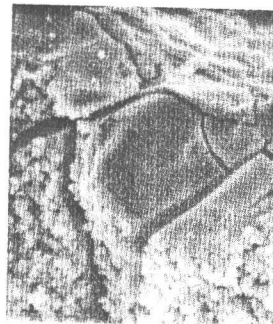


A コンクリート研り片

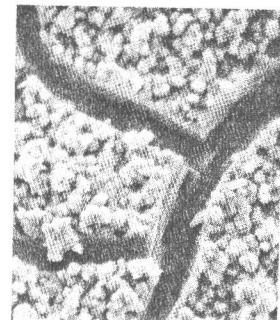


C コンクリートコア

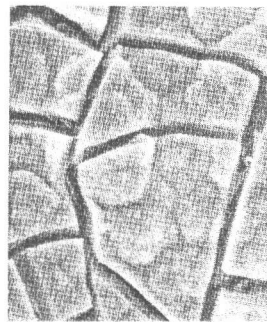
図-2 コンクリートの破断面の状態



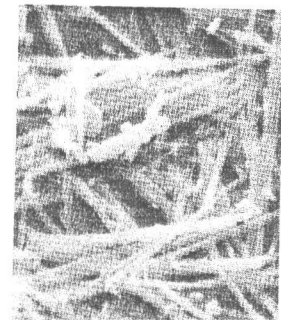
A (X1000)	Na	20.46
	Ca	9.09
	K	7.87
	Si	60.01



B (X1000)	Na	22.19
	Ca	16.14
	K	4.78
	Si	56.89



C (X1000)	Na	23.60
	Ca	15.03
	K	5.76
	Si	55.25



D (X4000)	Ca	57.66
	Al	14.50
	S	23.06

図-3 反応生成物のSEM写真とXMA分析値
(分析値はモル%)

3.4 コンクリートの塩分含有量について

アルカリ骨材反応には骨材中に反応性のケイ酸鉱物を含有するという条件の他に、その反応に必要なアルカリの存在が重要である。アルカリの供給源としては、通常はセメントが考えられるが、³⁾ 海水等の混入・浸透によるものも指摘されている。そこでA, B, C構造物の塩分含有量について検討した。図-6には表面からの深さと全塩分の関係について示している。表層1cmを除いて表面近くで0.35~0.40%と高く、深さが増すにつれて減少しているが、10cm付近でも0.15%前後と高い状態にある。したがって海水の浸透以外で塩分がコンクリート中に混入した可能性がある。

そこで全塩分と遊離塩分との差つまり固定された状態における塩分量についてみた。いずれのコンクリートも表層1cmを除いて0.1%以上であり深さが増すにつれてやや減少するが、約0.1%で収束している。固定された塩分がすべて、外部環境から供給されたものであれば、深さが増せば0%に収束すると考えられる。よって0.1%という塩分量は初期に導入され、固定された塩分量に相当すると推定される。尚表層1cm部分に固定された塩分が少ないのは、C₃Aの炭酸化によるものと考えられる。

以上からA, B, Cコンクリートは、外部環境からの塩分の導入の他に、コンクリート打設時に導入された塩分が相当量あり、水和の初期からアルカリが豊富な状態にあったと推定される。またアルカリ骨材反応と塩分との間に関連があることが示唆される。

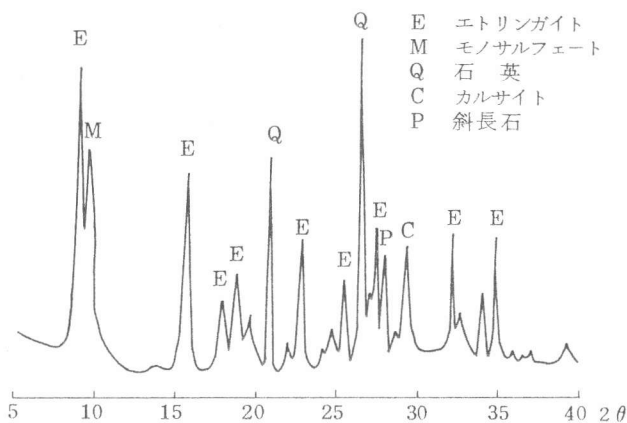


図-4 D構造物コンクリートの白色物質のX線回折図

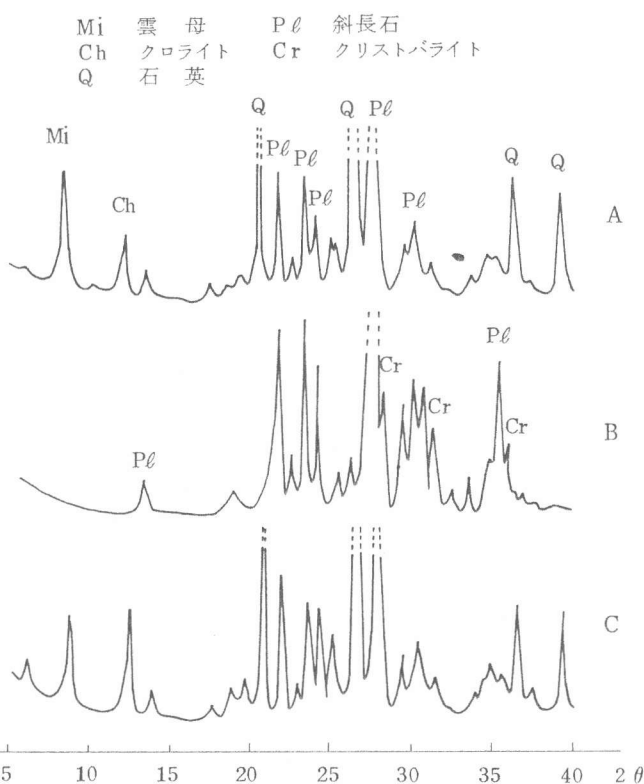


図-5 A, B, Cコンクリートの粗骨材のX線回折図

表-2 粗骨材の偏光顕微鏡観察結果

構造物	A	B	C
主要岩石名	1. 斜方輝石安山岩 2. 千枚岩	輝石安山岩	1. 黒色粘板岩 2. 角礫岩
特徴	1. 斑晶が極めて乏しく、石基は斜長石、斜方輝石、ガラスである。 2. 基質は石英脈あり、黒雲母生成	斑晶は斜長石、斜方輝石、単斜輝石であり新鮮 石基は斜長石、輝石であり、新鮮。ガラス多く、クリストパライト少	1. 基質は石英、斜長石、カリ長石、絹雲母、方解石、緑泥石からなる。 2. シルト岩、細粒砂岩であり充填物としては石英、方解石、緑泥石、絹雲母、黄鉄鉱

3.5 エトリンガイトの生成について

D 構造物コンクリートのエトリンガイトの生成について検討した。通常コンクリート中におけるエトリンガイトの生成は、 C_3A の瞬結を防ぐためにあらかじめ混合されたセッコウと C_3A の反応により、セメントの水和の初期段階に起こる。しかしDコンクリートは打設後約12年経過しているにもかかわらず多量のエトリンガイトが生成している。このような後期におけるエトリンガイトの生成には以下に示す3つの要因が考えられる。

1. イオウ分の外部環境からの浸透による生成
2. コンクリート中での骨材の風化に伴うイオウ分の放出による生成
3. セメント中のイオウ分の後期における反応性の発現による生成

以上の要因のうち、第1要因は表-3に示したようにコンクリートの SO_3 含有量は表面で 0.38% でありその量はコンクリートの深さとは無関係ではば一定である。したがって考え難い。

第2要因は粗骨材、細骨材中のイオウ分は少量であるため、供給源としては考え難い。したがって第3要因が予想される。コンクリート打設時の配合は不明であるが、コンクリート重量を 2.4t、単位セメント量を 300kg と仮定するとセメント中の SO_3 含有量は約 3.3% となる。ポルトランドセメントの平均的な SO_3 含有量は 2.0% であるので、平均的な含有量以上のイオウ分が何らかの過程でセメントに混入し、かつ通常添加される形態である2水セッコウとは異った、非常に反応性の低い状態（例えば還元性の硫化物のようなもの）で存在していたと考えられる。このようなイオウ分が時間の経過とともに反応性を増し、コンクリート硬化後なお残存しているアルミネート相・フェライト相と反応し、エトリンガイトの生成に至ったと推定される。

4. まとめ

- (1) 4 構造物のひび割れは網目状で表面が汚れているが特徴である。
- (2) 4 構造物のうち A, B, C はアルカリ骨材反応によるひび割れであり、D はエトリンガイトによるひび割れであると考えられた。
- (3) アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの粗骨材は輝石安山岩が主体でガラス・クリストバライトを含むものと、熱水変成を受けた岩が主体で反応性の鉱物の存在が不明なものがあった。
- (4) A, B, C 構造物のコンクリートは打設時に導入したとみられる塩分があり、この塩分がアルカリの供給源の一つであると推定された。
- (5) D 構造物のエトリンガイトの生成はセメントに混入したイオウ分が反応性の低い形態で存在し、時間の経過とともにその反応性が増加して起きたものと推定された。

参考文献

- 1) 腐食防食研究委員会：硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（案）：コンクリート工学 1984・12
- 2) 森野奎二：アルカリ反応性骨材の岩石学的考察：第6回コンクリート工学年次講演会論文集1984
- 3) 二村誠二、福島正人：コンクリート用砕石のアルカリ・シリカ反応による膨脹：第6回コンクリート工学年次講演会論文集1984

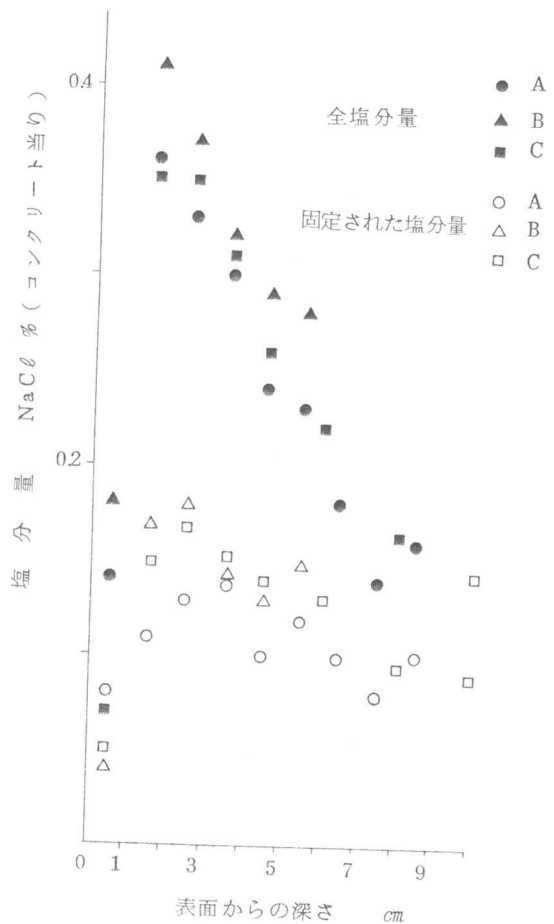


図-6 表面からの深さと塩分含有量

表-3 表面からの深さと SO_3 含有量

表面からの深さ cm	SO_3 %
0~5	0.38
5~10	0.46
10~15	0.34
15~20	0.46
20~25	0.40
25~30	0.42