

# セメント・コンクリートと無機工業薬品

## Relation of Inorganic Industrial Reagents to Cement and Concrete

半田 栄一

Eiichi HANDA

### はじめに

日本化学工業株式会社（以下当社）では、多種の無機工業薬品を製造販売している。それらの用途は多岐に涉り、当然のことながら土木・建設関連にも多種使用されている。土木・建設関係となると、その範囲と使用される工業薬品の種類が余りにも多くなるので、当社製品および同類の工業薬品がセメント・コンクリートに使用される場合について述べてみたい。

土木関連に関する古い社内文献が見当たらないので明らかではないが、当社で開発したコンクリート関連製品は、吹き付けコンクリートの急結剤として使用するハーデックスが最初であると思う。ハーデックスは、無水アルミン酸ソーダと炭酸ソーダの混合物を弁柄（酸化第二鉄）で赤色に着色したものである。以下にハーデックスも含め、筆者が知見している範囲でセメント・コンクリート（セメントモルタル、コンクリート製品）と工業薬品との係わりを述べる。

### 1 セメントの凝結・硬化速度の調節

#### 1.1 促進剤・遅延剤の種類

セメントの硬化は、その成分であるエーライト（ $C_3S$ ）とビーライト（ $\beta-C_2S$ ）、アルミネート（ $C_3A$ ）およびフェライト（ $C_4AF$ ）の水和反応が基本である。この反応は、幾つかの素反応が組み合わさったものでかなり複雑であり、 $C_3S$ と $\beta-C_2S$ は最終的に水和過程で準安定相を経た後、トベルモライト（ $Ca_3Si_2O_7 \cdot 3H_2O$ ）<sup>注</sup>として安定化する。



注） $5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 5H_2O$ の組成を持つスコットランドで発見された天然鉱物。同様の結晶構造を持っているのでセメント水硬生成物もトベルモライトと呼ばれている。

コンクリート用語（JIS A 0203）では水和反応により流動性を失い硬くなることを凝結、凝結後に硬さや強度が増すことを硬化と定義しており、凝結・硬化の速度を速めるものが促進剤、逆に速度を遅らせるものが遅延剤と呼ばれている。特に、吹き付け工事に用いられる凝結時間を著しく短くする促進剤を急結剤と定義している。表1に無機系・有機系の促進剤、遅延剤の化合物例を示す<sup>1)</sup>。

一般的に、促進剤には無機系化合物が使用される。その一方、遅延剤には分散剤としての性能も有する有機系化合物が使用されることが多い。ここでは、遅延剤については表の紹介に留めて無機系の促進剤について触れることにする。

#### 1.2 無機系の促進剤

セメントの構成物質は、エーライト（ $C_3S$ ）、ビーライト（ $\beta-C_2S$ ）、アルミネート（ $C_3A$ ）、フェライト（ $C_4AF$ ）、石膏（ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ）である。ここで $C_3S$ 、 $\beta-C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$ はクリンカーに由来するものであり、石膏は $C_3A$ 、 $C_4AF$ の瞬結を押さえるためにクリンカー粉碎時に添加されている。水和反応が進むとこれらは、トベルモライト（完全硬化前は珪酸カルシウム水和物：C-H-Sゲル）、水酸化カルシウム、エトリンガイト（ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ）、アルミネート水和

表1 促進剤、遅延剤の成分による種類と化合物例

| 種類     | 促進剤                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 遅延剤                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 無機系化合物 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塩化物 (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, KCl)</li> <li>・亜硝酸塩 (Ca(NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, NaNO<sub>2</sub>, KNO<sub>2</sub>)</li> <li>・硝酸塩 (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>, KNO<sub>3</sub>)</li> <li>・硫酸塩 (CaSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</li> <li>・チオシアン塩 (NaSCN)</li> <li>・アルカリ (NaOH, KOH)</li> <li>・炭酸塩 (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)</li> <li>・珪酸ソーダ</li> <li>・アルミナ系 (Al(OH)<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</li> <li>・アルミン酸アルカリ塩 (NaAlO<sub>2</sub>, Ca(AlO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ケイフッ化物 (MgSiF<sub>6</sub>)</li> <li>・ホウ酸類 (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)</li> <li>・リン酸塩 (K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)</li> <li>・亜鉛化合物 (ZnO)</li> <li>・鉛化合物 (PbO)</li> <li>・銅化合物 (CuO)</li> </ul> |
| 有機系化合物 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・アミン類</li> <li>・有機酸の Ca 塩</li> <li>・無水マレイン酸</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・オキシカルボン酸とその塩類</li> <li>・ケト酸とその塩類</li> <li>・アミノカルボン酸とその塩類</li> <li>・糖類</li> <li>・糖アルコール類</li> <li>・高分子有機酸とその塩類</li> <li>・水溶性アクリル酸とその塩類</li> </ul>                                                 |

物、フェライト水和物を形成する。石膏は、C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AFと反応してエトリンガイトを生成し、C<sub>3</sub>A や C<sub>4</sub>AF の表面に析出してこれらと水との接触を妨げる。従って、石膏量が適正であれば後の水和反応が急激に進行しない。残る C<sub>3</sub>S と β-C<sub>2</sub>S の水和反応を比較すると、β-C<sub>2</sub>S は安定なため水和反応 (2) が遅く、初期の凝結過程には殆ど関与せずに硬化体の長期強度の増加に寄与する。一方、凝結および初期硬化過程に支配的な影響を及ぼすが、セメント成分中の半分以上を占める C<sub>3</sub>S の水和反応 (1) である。C<sub>3</sub>S の水和は急激に起こるが、初期の水和後ある一定期間水和反応が休止し (水和潜伏)、その後発熱を伴った水和加速期に移行する。この水和休止期 (水和潜伏期) を如何に短くし、水和加速期を如何に早く迎えるようにするかの目的で使用されるのが促進剤である。促進剤は、早期脱型により高価な型枠の回転率を高める目的や、寒冷時におけるコンクリートの硬化時間を早める目的で使用される。塩化カルシウム (CaCl<sub>2</sub>) は代表的な凝結促進剤であり、低温下でもセメントの水和を著しく促進する。多量の CaCl<sub>2</sub> は急結剤としても使用でき経済的にも有利であったが、以下の理由により鉄筋コンクリートには使用されなくなった。

近年、コンクリート中の鉄筋に発錆を促す塩化物量がある一定水準以下に抑える目的で各種の規定、基準類の改定が行われた。レディミクストコンクリートの規格 (JIS A 5308) 改正により、コンクリート中の塩化物総量規制値として 0.3 Kg/m<sup>3</sup> が定められた。CaCl<sub>2</sub> を促進剤として使用すると塩化物総量が規制値 0.3 Kg/m<sup>3</sup> を超えてしまい、実質的に鉄筋コンクリートには使用すること

は出来ない。

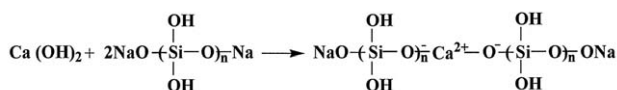
現在、塩化物以外の物質を使用した促進剤の開発が行われているが (例えば硫酸塩とアミン類)、価格と効能の面であまり広まっていないのが現状である。

### 1.3 無機系の急結剤

急結剤の作用は促進剤と類似しているが、初期凝結過程である程度の強度を持たせるために使用するのの様子は少し異なる。急結剤には次の系列がある。

- 初期水和後に C<sub>3</sub>S と水との接触を妨げず、水和潜伏期間を見かけ上省くもの (炭酸塩等)
- 石膏 (CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O) の溶解を促進しエトリンガイトの生成を促すもの (塩化物)
- C<sub>3</sub>S の初期水和反応に影響を及ぼし、初期反応を急激、多量に起こすもの (アルミン酸ソーダなどのアルミン酸塩)
- セメント成分に作用しなくても、自分でエトリンガイトを生成するもの (カルシウムアルミネート類と石膏、カルシウムサルホアルミネート類)

これらの系列から外れたものとして珪酸ソーダ (珪酸ナトリウム) がある。珪酸ソーダは、セメントの水和により生成した Ca(OH)<sub>2</sub> と反応してカルシウムシリケート水和物を形成し、そのゲルによって急結作用を示すと考えられている<sup>2)</sup>。



吹き付けコンクリート用急結剤の品質規格は、土木学会の吹き付けコンクリート用急結剤品質規格として表2のように示されている<sup>3)</sup>。

前述の系列のなかで、規格を満たして現在市販されている主要な急結剤の特徴を表3に示す<sup>4)</sup>。

表中のA、B、Dタイプはアルミン酸アルカリ塩及び炭酸アルカリ塩が主要組成でDタイプは液状である。C

タイプはカルシウムアルミネート系鉱物で、Eタイプはサルホアルミネート系鉱物が主体である。前述のハードックスはAタイプに属する。最近では強度を必要としない場所で使用するノンアルカリ急結剤として、硫酸バンド（硫酸アルミニウム：Dタイプに属する）溶液を使用している例もある。

表2 吹き付けコンクリート用急結剤品質規格

| 項目   | 凝結時間<br>/ min |      | 圧縮強度*<br>/ Kg f cm <sup>-2</sup> |       |       |
|------|---------------|------|----------------------------------|-------|-------|
|      | 始発            | 終結   | 12時間                             | 24時間  | 28日   |
| 品質規格 | 5以内           | 15以内 | 10%以上                            | 90%以上 | 75%以上 |

\*急結剤を混入しないモルタルに対する強度比率

表3 主要な急結剤の特徴

|                                   |
|-----------------------------------|
| Aタイプ：安価で、しかも低添加量なので最も普及している。      |
| Bタイプ：アルカリ性を抑制し改良されたもの。            |
| Cタイプ：急結力を強くし、跳ね返りを減少させ湧水部でも使用できる。 |
| Dタイプ：圧送ホースの詰まりがない。湿砂を多く用いる所に適する。  |
| Eタイプ：アルカリ性が低く、安定した高強度が必要な湿式法に向く。  |

1.4 塩化カルシウムと珪酸ソーダ

型枠の利用効率を高めるために使用する凝結促進剤として、現在でも使用コストが安い塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)が多量に使用されている。しかし、壁用ボードなどの建材にCaCl<sub>2</sub>を使用すると、コンクリート釘の発錆やそれに伴ったコンクリート劣化等の問題が生じる。この対策として、使用検討されているのが珪酸ソーダである。CaCl<sub>2</sub>と各種珪酸ソーダを用いて脱型時間を60分(可使時間は約30分)になるように設計したサンプルの圧縮強

度試験結果を表4に示す。

表4から分かるように、脱型時間60分(可使時間30分)程度となるような珪酸ソーダ量は、セメントに対して1.5%(促進剤(固形)/C=0.015)でありCaCl<sub>2</sub>と差異は見られなかった。また、凝結時間がほぼ等しい場合、珪酸ソーダを促進剤として使用した試料は、CaCl<sub>2</sub>使用品よりも初期圧縮強度は強いが、時間がたつと強度が逆転する傾向が見られた。

表4 各促進剤を用いた時のモルタルの圧縮強度\*

| 促進剤               | 1日強度<br>/ kN mm <sup>-2</sup> | 7日強度<br>/ kN mm <sup>-2</sup> | 脱型時間<br>/ min |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| CaCl <sub>2</sub> | 5.88                          | 12.06                         | 65            |
| 1号珪酸ソーダ           | 7.35                          | 11.57                         | 60            |
| 2号珪酸ソーダ           | 7.06                          | 10.40                         | 60            |
| 3号珪酸ソーダ           | 5.98                          | 10.98                         | 60            |
| 4号珪酸ソーダ           | 6.96                          | 10.78                         | 60            |

\*細骨材7号珪砂(F)、セメント(C)、水(W)、F/C=2、W/C=0.65、促進剤(固形)/C=0.015

## 2 コンクリートの破碎

岩石やコンクリート構造物の破碎、解体工事にはダイナマイトや重機械類が使用されてきた。しかし騒音、振動、粉塵などの環境公害や安全の面からそれらの取り扱いや、規制が厳しくなっている。とりわけ、都市部やトンネルなどの周辺では、周囲に配慮した破碎、解体工法の要望が強い。こうしたことを背景に、鉱物の膨張圧を利用した破碎工法が開発された。この工法で用いられる静的破碎剤の主成分は酸化カルシウム（CaO）であり、水と反応して水酸化カルシウム（Ca(OH)<sub>2</sub>）になるときの膨張圧を利用するというものである。CaOのCa(OH)<sub>2</sub>となるときの体積膨張は拘束状態で1.6～2倍、非拘束で約3倍あり、充分なコンクリート破碎性能を有する。しかし、開発初期には水和反応が速すぎて充填孔より噴出するなどのトラブルが生じた。この問題点を解決するため、現在ではCaOの表面に3CaO・SiO<sub>2</sub>および石膏をコーティングした静的破碎剤が使用されている。ここで3CaO・SiO<sub>2</sub>をコーティング剤として使用しているのは、3CaO・SiO<sub>2</sub>と水が反応して生成する珪酸カルシウムゲルがCaOの急激な水和反応を抑制するためである。

## 3 コンクリートの着色

近年、コンクリート床や壁およびコンクリート造型物に着色する要望が徐々に増えてきている。セメントに着色するための顔料には、セメントの化学特性、製造条件および使用条件によって次のような特性が要求される。

- a コンクリートの強度低下をおこさない
- b 耐アルカリ性
- c 耐光性
- d 耐熱性
- e 耐候性

顔料の使用に際して色調の面から見ると、セメントに混合するのでなに色であれ鮮やか色彩を出すのは難しいし、顔料の添加量は色彩によって非常に異なる。また成型時の品質管理が一定でないと、同量の顔料を使用しても色調が微妙に違ってくる。さらにセメント水和物との接着性が良くない顔料をそのまま使用すると、顔料の剥落によりコンクリートが退色することもある。これらの問題点を解決するためには無機顔料が一番優れており、当社製品では酸化クロム（Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）が優秀な緑色顔料として使用されている。

コンクリート製品に後から塗料で着色すると、コンクリートの質感を失ってしまう場合がある。日本では打ち放しコンクリートの質感が好まれるので一般的ではない

が、欧米ではこのような場合浸透性の着色剤が使用されている。

アメリカ合衆国のN社製の褐色着色剤は、鉄、クロム及びマンガンの塩酸塩溶液からなり、その酸性度は100倍希釈時でpH1.85である。使用方法は、コンクリートの表面に、刷毛、ローラー又は噴霧により着色剤を塗り反応させる。コンクリート表面は酸で腐食され、そこに反応により生成した金属水酸化物が付着する。一部は生成した塩化カルシウムと伴に浸透して、浸透内部に水酸化物を生成する。表面に付着した大部分は、雨に当たる、擦れるなどの使用条件により剥離してしまうが、内部に浸透生成した水酸化物によって薄い色が残る。着色剤中の金属成分は表5のとおりである。

表5 着色剤中の金属成分

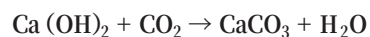
| 成分                             | 含有量<br>/ wt% |
|--------------------------------|--------------|
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.62         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.06         |
| MnO                            | 0.04         |

この系統の着色剤は、金属水酸化物により着色するため色の種類は少ない。

## 4 コンクリートの表面強化

### 4.1 珪酸塩系表面処理剤

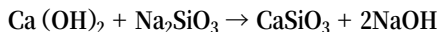
コンクリートに水が浸入すると、細孔内にある水酸化カルシウムが溶解する。これが表面水の蒸発による水の移動に伴ってコンクリート表面に移動し、空気中の炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムを生成する。この繰り返しによりコンクリートは中性化し劣化していく。



またコンクリートは酸に弱く酸性雨の侵食によっても劣化する。これらを防止するための最も安易な方法として表面塗装が挙げられるが、経時変化による再塗装を考えると経済的ではない。加えて、工場や倉庫の床にコンクリートを打った場合、コンクリート表面が削れて発塵の原因にもなる。この防止の為にエポキシやアクリル樹脂による塗装も考えられるが、多大の費用がかかることが懸念されている。これら問題点を解決するためにコンクリート表面処理剤が用いられる。コンクリート表面処理剤の主成分は可溶性の珪酸塩であり、その効果を増強するために微量成分が添加されている。効果作用は、コンクリート表面に塗られた珪酸塩が浸透しコンクリート



細孔中の水酸化カルシウムと反応して珪酸カルシウムの結晶を生成することにより生じる。珪酸塩が珪酸ナトリウムの場合は次式のように反応する。



この珪酸カルシウムの結晶は、ヘアクラックやセミクロポア内にも生成・成長するためクラックなどの補修作用にも効果的である。どのような処理効果に重点を置かで、メーカーによって表面処理剤の呼び方が変更されており、表面硬度アップを強調する場合はコンクリート

表面処理剤として、表面の高密度化による透水比の低下と補修作用を強調する場合はコンクリートの防水補修剤として販売されている。コンクリートの中性化により水酸化カルシウムが不足している場合、カルシウムの有機酸塩を前もって塗布浸透させることにより反応性のカルシウム塩を補ってから、表面処理剤の塗布浸透処理が行なわれる。

#### 4.2 表面処理剤の比較

当社および他社で製造・販売している表面処理剤の主成分(例)を表6に示す。

表6 コンクリート表面処理剤の主成分組成

| 表面処理剤  | Na <sub>2</sub> O<br>/ wt% | SiO <sub>2</sub><br>/ wt% | F<br>/ wt% |
|--------|----------------------------|---------------------------|------------|
| 日本化学工業 | 4.02                       | 12.29                     | 0.150      |
| A社     | 1.00                       | 5.41                      | ----       |
| B社     | 3.73                       | 11.49                     | ----       |
| C社     | 4.27                       | 14.18                     | 0.170      |
| D社     | 6.18                       | 18.29                     | ----       |
| E社     | 4.52                       | 14.26                     | 0.004      |

表面処理剤の総合効果を比較検討することは、施工躯体の状態により結果が異なるので難しい。しかし、表面硬度アップについては標準モルタル供試体を作成し処理をすることにより比較することができる。各種表面処理剤を用いて処理した標準モルタル供試体の耐磨耗試験結果を図1に示す。J1号、J2号とあるのはJIS1号珪酸ソ

ーダとJIS2号珪酸ソーダの3倍希釈品であり、J3号とあるのはJIS3号珪酸ソーダの2.5倍希釈品である。試験は、ティーバー式耐磨耗試験機でCS-10の磨耗輪使用して1,000gの荷重を掛け、100回転毎の供試体減量を比較して行った。結果より、何れの処理も未処理に対して表面硬度がアップしていることが分かる。

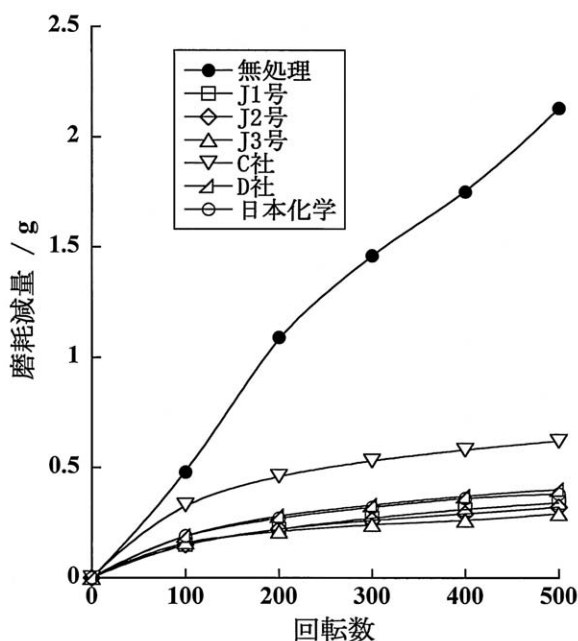


図1 各表面処理剤を使用した供試体の耐磨耗試験結果

## 5 コンクリートの劣化予防

### 5.1 劣化予防処置

通常、コンクリートの経時劣化は、中性化、塩害、アルカリ骨材反応が原因とされている。これらを予防するためには、コンクリートの打設時およびそれ以降に次のような処置が必要である。

- a コンクリート中に塩化物を持ち込まない。
- b 低アルカリセメントを使用する。
- c 反応性骨材を使用しない。
- d W/Cを小さくして緻密なコンクリートを打つ。
- e 練りを確実にし結合力の強いコンクリートを打つ。
- f シラン系防水剤処理やポリマーセメントモルタルの表層被覆などにより水分の浸入を予防する。

ここでは、中性化、塩害の予防処置については割愛し、アルカリ骨材反応について述べることにする。

### 5.2 アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応はセメント中のアルカリと骨材中のシリカなどの成分により起こる化学反応とその結果生じたコンクリートの劣化現象である。アルカリ骨材反応は、反応性シリカ鉱物によるアルカリシリカ反応、含粘土ドロマイト質石灰石によるアルカリ炭酸塩反応、岩石中に含まれる粘土中のシリカ成分（シリケート）によるアルカリシリケート反応と大きく三種に大別されており、日本におけるアルカリ骨材反応の大部分はアルカリシリカ反応といわれている。アルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化は次のような過程を経て進行する。

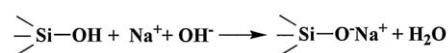
- ① 化学反応によりアルカリシリケートが生成する。
- ② アルカリシリケートがゲル化しコンクリートの細孔液を吸収して膨張する。
- ③ 膨張によりコンクリートにひび割れが生じ、シリカゲルの表面への侵出やポップアウトを引き起こす。

以前には、日本にアルカリ骨材反応は殆ど存在しない

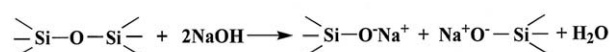
と言われてきたが、調査の結果ほぼ全国的にアルカリ骨材反応の存在が明らかになってきた。

### 5.3 アルカリシリカ反応の反応機構

シリカをシロキサン結合で3次元構造を有するとした場合、その表面は水の水素イオン（ $H^+$ ）と反応してシラノール基（ $-Si-OH$ ）を作り、弱い酸性になっている。そこに水酸化ナトリウムが反応して次のような置換反応が起きる。

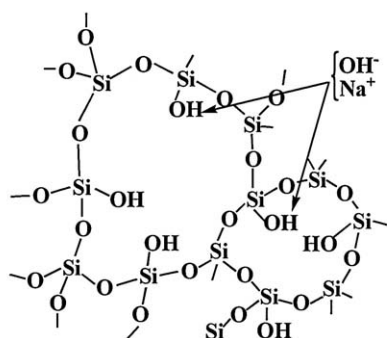


シリカに対して水酸化ナトリウムが過剰に存在している場合、上記の中和反応だけにとどまらず、以下の式のように  $Si-O-Si$  が切断される。

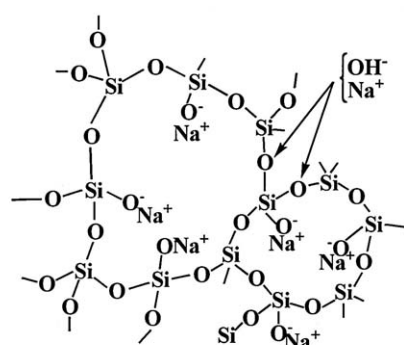


アルカリシリカ反応を非晶質シリカをモデルとして考えると図2<sup>6,7)</sup>のようになる。

図2で、反応性のシリカに対してアルカリ量が不足しているときは、シラノール基の中和とシロキサン結合のチェーンが一部分切断されるのみで、アルカリシリケートの生成・ゲル化が起きにくい（図2(a)）。従って、この場合にはコンクリートの膨張も生じない。一方、シリカに対して水酸化ナトリウムの濃度が充分高い場合、 $Si-O-Si$  の切断から吸水性の高いアルカリ・シリカゲルが生成する（図2(b)）。すなわちアルカリシリカ反応を引き起こすには、反応性シリカ量、アルカリ分、そして水分が互いにあるバランス条件で存在する必要がある。たとえ、コンクリート中に高濃度のアルカリが存在していたとしても反応性シリカが大過剰にあればアルカリシリカ反応は発現しない。この現象を利用して、ポゾラン物質を添加したり、高炉セメントやフライアッシュセメント使用してアルカリシリカ反応を抑制している。



(a) アルカリ分が少ない場合（中和反応）



(b) アルカリ分が過剰な場合（ $Si-O-Si$ 結合の切断）

図2 非晶質シリカとアルカリの反応モデル

5.4 アルカリ骨材反応の防止

アルカリ骨材反応の防止はアルカリ・シリケートゲルを形成させないことが第一である。従って、5.1に記述した低アルカリセメントを使用する、そして反応性骨材

を使用しないの2点に尽きる。骨材の反応性を調べるには、まず骨材の性状を知る必要がある。骨材中に含まれる反応性鉱物、反応性岩石、反応性骨材を表7に示す<sup>8)</sup>。

表7 アルカリ反応性鉱物と反応性岩石および骨材

| 分類                        | アルカリ骨材反応を起こす鉱物、岩石、骨材                                                |                      | 反応の種類                       |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 反応性鉱物                     | オパール、クリストバライト、トリジマイト、<br>玉髄、石英（潜晶質、格子のひずんだもの）、<br>火山ガラス（酸性、中性）、加水雲母 |                      | アルカリシリカ反応<br>アルカリシリケート反応    |
|                           | ドロマイト                                                               |                      | アルカリ炭酸塩反応                   |
| 反応性岩石<br>(反応性鉱物を多量に含んだ岩石) | 火成岩                                                                 | 流紋岩、黒曜石、松脂岩、安山岩、浮岩   | アルカリシリカ反応<br>(含アルカリシリケート反応) |
|                           | 堆積岩                                                                 | チャート、砂岩、頁岩、凝灰岩、珪質石灰岩 |                             |
|                           | 変成岩                                                                 | 千枚岩、珪岩、花崗岩質片麻岩、片岩    |                             |
|                           | 堆積岩                                                                 | ドロマイト質石灰岩、粘土質苦灰岩     | アルカリ炭酸塩反応                   |
| 反応性骨材<br>(反応性岩石を含んだ骨材)    | 反応性岩石の碎石、砕砂                                                         |                      | アルカリシリカ反応<br>(含アルカリシリケート反応) |
|                           | 反応性岩石を含む玉石、砂利、砂                                                     |                      |                             |

5.5 日本でのアルカリシリカ反応抑制対策

日本におけるアルカリシリカ反応への対応としては、昭和61年6月に「アルカリ骨材反応暫定対策（土木構造

物）（建築物）」、「アルカリ骨材反応対策に関する暫定指針」が出され、これらの規定は平成1年7月の建設省審議官通達に引き継がれている。

表8 建設省通達：アルカリ骨材反応抑制対策（土木構造物）

|                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アルカリ骨材反応抑制対策（土木構造物）                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                     |
| 1. 適用範囲                                                                                                                                   | 建設省が建設する土木構造物に使用されるコンクリートおよびコンクリート工場製品に適用する。ただし、仮設構造物のように長期の耐久性を期待しなくてもよいものは除く。                                                                                                                                                     |
| 2. 抑制対策                                                                                                                                   | 土木構造物に使用するコンクリートは、アルカリ骨材反応を抑制するため次の4つの対策の中のいずれか1つを取らなければならない。                                                                                                                                                                       |
| 2.1 安全と認められる骨材の使用                                                                                                                         | 骨材のアルカリシリカ反応試験（化学法またはモルタルバー法） <sup>注</sup> の結果で無害と確認された骨材を使用する。                                                                                                                                                                     |
| 2.2 低アルカリ形セメントの使用                                                                                                                         | JIS R 5210 ポルトランドセメントに規定された低アルカリ形セメントに適合したセメントを使用する。                                                                                                                                                                                |
| 2.3 抑制効果のある混合セメント等の使用                                                                                                                     | JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント「B種またはC種」あるいはJIS R 5213 フライアッシュセメントに適合するフライアッシュセメント「B種またはC種」、もしくは混和材を混合したセメントでアルカリ骨材反応抑制効果の確認されたものを使用する。                                                                                                |
| 2.4 コンクリート中のアルカリ総量の抑制                                                                                                                     | アルカリ量が表示されたポルトランドセメント等を使用し、コンクリート1m <sup>3</sup> に含まれるアルカリ総量をNa <sub>2</sub> O換算で3.0kg以下にする。<br>なお、海水または潮風の影響を著しく受ける海岸付近において、2.2、2.3、または2.4のいずれかの対策をとる場合で、アルカリ骨材反応による損傷が構造物の安全性に重大な影響を及ぼすと考えられる場合には、塩分の浸透を防止するための塗装等の措置を講ずることが望ましい。 |
| 注：別途定めた建設省の試験方法によるものとする。ただし、上記の試験方法に代えて、JIS A 5308 レディミクストコンクリートの付属書7「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）」、または付属書8「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」を用いてもよい。 |                                                                                                                                                                                                                                     |

表9 建設省通達：アルカリ骨材反応抑制対策（建築物）

|                                                                                                                                           |                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アルカリ骨材反応抑制対策（建築物）                                                                                                                         |                                                                                                                                          |
| 1. 適用範囲                                                                                                                                   | 建設省が建設する建築物およびコンクリート工場製品等に適用する。ただし、仮設構造物のように長期の耐久性を期待しなくてもよいものは除く。                                                                       |
| 2. 抑制対策                                                                                                                                   | 建築物等に使用するコンクリートは、アルカリ骨材反応を抑制するため次の2.1から2.4のいずれかとする。なお海水または潮風の影響を受ける地域に建築される建築物のうち、屋外に面するコンクリート造の部材には、必要に応じ、塩分の浸透を防止するための防水性の仕上げを施すものとする。 |
| 2.1 安全と認められる骨材の使用                                                                                                                         | 骨材のアルカリシリカ反応試験（化学法またはモルタルバー法） <sup>注</sup> の結果で無害と確認された骨材を使用する。                                                                          |
| 2.2 低アルカリ形セメントの使用                                                                                                                         | JIS R 5210 ポルトランドセメントに規定された低アルカリ形セメントに適合したセメントを使用する。                                                                                     |
| 2.3 抑制効果のある混合セメント等の使用                                                                                                                     | JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント「B種またはC種」あるいはJIS R 5213 フライアッシュセメントに適合するフライアッシュセメント「B種またはC種」、もしくは混和材を混合したセメントでアルカリ骨材反応抑制効果の確認されたものを使用する。     |
| 2.4 コンクリート中のアルカリ総量の抑制                                                                                                                     | アルカリ量が表示されたポルトランドセメント等を使用し、コンクリート1m <sup>3</sup> に含まれるアルカリ総量をNa <sub>2</sub> O換算で3.0kg以下にする                                              |
| 注：別途定めた建設省の試験方法によるものとする。ただし、上記の試験方法に代えて、JIS A 5308 レディミクストコンクリートの付属書7「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）」、または付属書8「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」を用いてもよい。 |                                                                                                                                          |

表10 アルカリ骨材反応抑制対策（土木・建築共通）案

|                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アルカリ骨材反応抑制対策（土木・建築共通）案                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1. 適用範囲                                                                                                            | 国土交通省が建設する構造物に使用されるコンクリートおよびコンクリート工場製品に適用する。ただし、仮設構造物のように長期の耐久性を期待しなくてもよいものは除く。                                                                                                                                                                       |
| 2. 抑制対策                                                                                                            | 土木構造物に使用するコンクリートは、アルカリ骨材反応を抑制するため、設計基準強度27N/mm <sup>2</sup> 以下のものについては、2.2または2.3の対策（必要に応じて2.1の対策）をとるものとする。<br>設計強度30N/mm <sup>2</sup> 以上のものについては、骨材のアルカリシリカ反応試験（化学法）を実施し、無害と確認された骨材を使用するか、無害でない場合は2.2の対策をとるものとする。ただし、高強度コンクリートについては2.1の対策をとらなければならない。 |
| 2.1 安全と認められる骨材の使用                                                                                                  | 骨材のアルカリシリカ反応試験（化学法）の結果で無害と確認された骨材を使用する。ただし、化学法については骨材の種類により取り扱いに注意し使用する。                                                                                                                                                                              |
| 2.2 抑制効果のある混合セメント等の使用                                                                                              | JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント「B種またはC種」あるいはJIS R 5213 フライアッシュセメントに適合するフライアッシュセメント「B種またはC種」、もしくは混和材を混合したセメントでアルカリ骨材反応抑制効果の確認されたものを使用する。                                                                                                                  |
| 2.3 コンクリート中のアルカリ総量の抑制                                                                                              | アルカリ量が表示されたポルトランドセメント等を使用し、コンクリート1m <sup>3</sup> に含まれるアルカリ総量をNa <sub>2</sub> O換算で3.0kg以下にする。                                                                                                                                                          |
| なお、海水または潮風の影響を受ける地域において、アルカリ骨材反応による損傷が構造物の安全性に重大な影響を及ぼすと考えられる場合（2.1の対策をとったものは除く）には、塩分の浸透を防止するための塗装等の措置を講ずることが望ましい。 |                                                                                                                                                                                                                                                       |



この間、JISの改定や標準示方書の改定、及び規定の追加などが行われ、日本におけるアルカリ骨材反応に対する対策はほぼ完成した。しかし反応性骨材の分布が全国に広がっていること、安全な骨材が枯渇してきていること、骨材のリサイクルが始まっていることなどの原因により、またアルカリ骨材反応の発生が懸念され始めている。国土交通省では、アルカリ骨材反応抑制対策の改訂を企画し、現在、ホームページに対策案を載せ広く意見を求めている。

安全な骨材が枯渇してくれば、対策は化学療法的処理に頼らねばならない。ボゾラン物質や高炉スラグなど潜在水硬性物質によるアルカリシリカ反応の抑制については多岐にわたり研究されているものの、その他の化学物質によるアルカリシリカ反応の抑制に関する研究論文は少ない。しかし日本でもリチウム化合物<sup>9)</sup>やリン酸塩<sup>10)</sup>などに関して研究され始め、実際リチウム化合物は実構造物に一部試用されてきている。リチウム化合物によるアルカリシリカ反応の抑制機構に関して詳細な説明はなされていないが、膨張の直接原因であるアルカリシリケート含水ゲルの生成を阻害すると考えられている。

## おわりに

コンクリートと無機工業薬品の係わりについて従来とは異なった観点から述べてみた。これからは工業薬品メーカーも数種の無機薬品を組み合わせることにより、新しい添加剤や処理剤を生み出して販売する必要があると

思う。例えばアルカリ骨材反応抑制効果を有する凝結促進剤や、塩害そして中性化の復元を兼ね備えた補修材などの開発が考えられる。

## 文 献

- 1) 田麦 典房 “コンクリート混和剤の開発と最新技術 VII 凝結・硬化調節剤”, シーエムシー, p.95.
- 2) 木村 馨他, 日本接着協会誌, 18, 116 (1982).
- 3) 土木学会 土木学会基準, (1986).
- 4) 中川 晃次他, セメントコンクリート, 427, 95 (1982).
- 5) 川村 満紀, アルカリ骨材反応の機構, アルカリ骨材に関するシンポジウム, 日本材料学会, 1985, p.3.
- 6) Glasser, L. S. D. and Kataoka, N., Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, 1981, S 252/23.
- 7) Figg, J, Proceedings of the 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Copenhagen, 1983, p.137.
- 8) コンクリート工学協会, コンクリート技術者のための偏光顕微鏡による骨材の品質判定の手引き, 1987, p.100.
- 9) 高倉 誠他, コンクリート工学年次論文報告集, 1988, p.761.
- 10) 本田 淳裕他, 土木学会第42回年次学術講演会, 1987, p.448.



著 者

氏名 半田 栄一

Eiichi HANDA

所属 無機開発部