

委員会報告

「炭酸化研究委員会報告」

委員長 小林一輔（千葉工業大学）

◇炭酸化研究委員会の構成

〔委員長〕 小林 一輔（千葉工業大学）

〔顧問〕 岸谷 孝一（日本大学）

〔委員〕 飯山 敏道（千葉大学）

和泉意登志（竹中工務店）

宇智田俊一郎（小野田セメント） \* 宇野 祐一（ショーボンド建設）

\* 大賀 宏行（東京大学） 檜野 紀元（建設省建築研究所）

片脇 清士（建設省土木研究所） \* 河合 研至（広島大学）

斎藤 広志（日本建築総合試験所） 鈴木 一孝（名古屋工業大学）

立松 英信（鉄道総合技術研究所） 永嶋 正久（三菱マテリアル）

飛坂 基夫（建材試験センター） 丸 章夫（地質鉱物エンジニアリング）

宮川 豊章（京都大学） 山崎 之典（日本セメント）

山本 忠守（日本道路公団） 依田 彰彦（足利工業大学）

[ \* 印 : 幹事 ]

1. 委員会設立の背景

この数年来、コンクリートの炭酸化に関する知見は大幅に書き換えられつつある。従来、コンクリートの炭酸化と言え、大気中の二酸化炭素の作用によってコンクリート中の水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化することによってコンクリートの保有する高いアルカリ性が失われる現象を意味するものであった。従って、これは“中性化”と呼ばれ、専ら鉄筋腐食との関連において取り上げられてきた。しかし、数年前に埼玉県の大規模集合住宅の建物の鉄筋コンクリート基礎から採取したコアに異常な変色現象が発見されてから、コンクリートの炭酸化が一躍、注目を集めることになった。炭酸化によって生じるコンクリート組織の変化、炭酸化によって生じるコンクリート内部における物質移動現象等に関する新しい知見が相次いで明らかにされ、炭酸化がコンクリートの早期劣化を引き起こす第3の要因として位置づけられることになった。さらに、近年、盛んに実施されるようになった実構造物の劣化調査結果は、昭和40年代以降につくられたコンクリート構造物において、炭酸化が急速に進行していることを明らかにしている。これらの情勢は、コンクリートの炭酸化について種々の角度から総合的に検討を行い、従来の炭酸化の考え方を根本的に洗い直して新しい炭酸化の概念を再構築する必要があることを示している。本研究委員会は以上のような情勢に対応するために設置されたものである。

2. 調査研究の概要

- 1) 委員会報告として『コンクリートの炭酸化に関する研究の現状』を取りまとめた。
- 2) コンクリート技術者または研究者が実構造物に生じている炭酸化を判定するための手引きとして、『炭酸化を受けたコンクリート構造物の判定マニュアル』を作成した。

3) 「コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム」を、1993年4月23日に都市センターホール(東京都)において開催した。

### 3. 『コンクリートの炭酸化に関する研究の現状』について

本報告は内外におけるコンクリートの炭酸化に関する主な調査研究の内容を検討して以下のような3部構成の報告書に取りまとめたものである。

#### 第1部 コンクリートの炭酸化機構

##### 第1章 セメント水和生成物の炭酸化

##### 第2章 コンクリートの炭酸化過程

#### 第2部 コンクリートの炭酸化とコンクリート構造物の劣化

##### 第1章 コンクリートの炭酸化速度に影響を及ぼす諸要因

##### 第2章 炭酸化がコンクリートの物性に及ぼす影響

##### 第3章 炭酸化と鉄筋腐食との関係

#### 第3部 実構造物におけるコンクリートの炭酸化の現状

##### 第1章 緒言

##### 第2章 中性化深さ

##### 第3章 鉄筋腐食に及ぼす影響

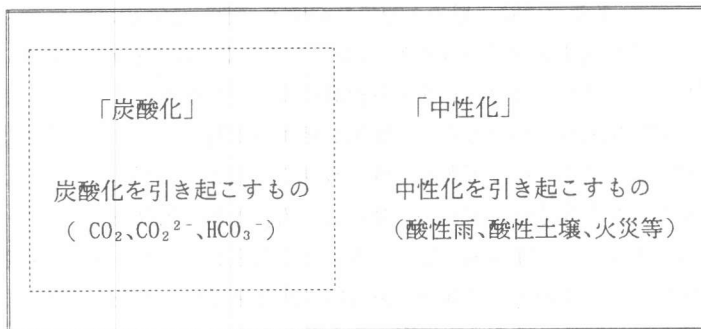
##### 第4章 調査例

本報告書では、コンクリートの炭酸化に関する用語を以下のように定義した。

◆ 炭酸化(carbonation) : セメントの水和生成物が、二酸化炭素と反応し、炭酸化合物及びその他の物質に分解する現象をいう。

◆ 中性化(neutralization): セメント硬化体のアルカリ性が低下する現象をいう。

以上の定義を図示すると以下のようなものである。



◆ エフロレッセンス(calcium efflorescence):

水に溶解したカルシウムイオンが水の移動によりコンクリートの表面に移動し、難溶性のカルシウム塩として析出したものをいう。

◆ 白華(alkali efflorescence):

水に溶解したアルカリ分が水の移動によりコンクリートの表面に析出し、大気中の二酸化炭素と結合した化合物をいう。

本報告書の主な内容を示すと以下のである。

1) 全てのセメント水和生成物は二酸化炭素の作用によって炭酸カルシウムと他の成分に分解する。

- 水酸化カルシウム:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
- C-S-H :  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{SiO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- エトリンジャイト:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow$   
 $3\text{CaSO}_4 + 2\text{Al(OH)}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 32\text{H}_2\text{O}$
- モノサルフェート:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow$   
 $3\text{CaSO}_4 + 2\text{Al(OH)}_3 + \text{CaSO}_4 + 12\text{H}_2\text{O}$
- その他 :  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 + 32\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow$   
 $3\text{CaSO}_4 + 2(\text{Al} \cdot \text{Fe})(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

2) 炭酸化の化学的進行過程において、コンクリートの細孔溶液の pH が高い程、炭酸化は急速に進行する。

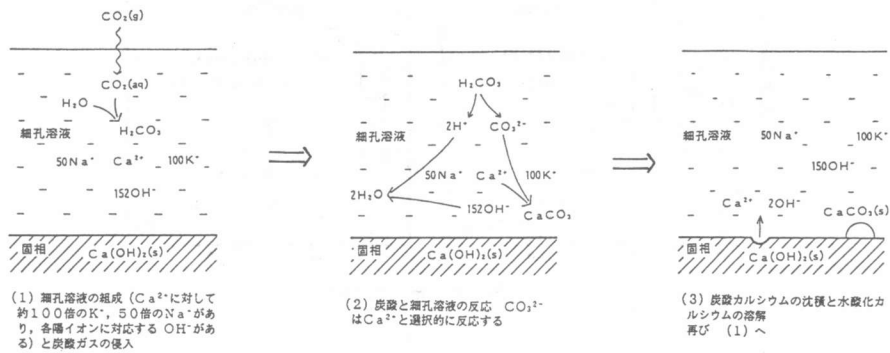


図-1 炭酸化の化学的進行過程の模式図

3) 炭酸化のフロントはフェノールフタレインによる呈色反応によって判定される界面よりも内部に存在する。即ち、炭酸化はステップ状に進行する。

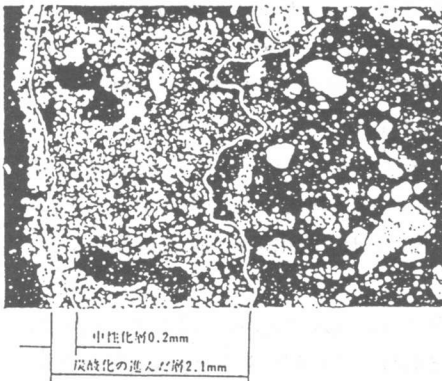


図-2 諸塚ダムコンクリートの  
中性化、炭酸化の状況

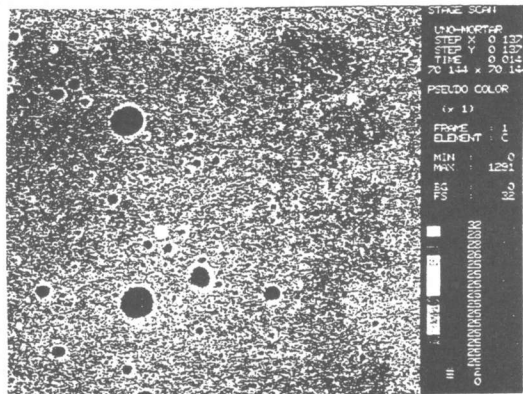


図-3 EPMAによるCの面分析

- 4) 炭酸化に伴って、コンクリート中に固定されていたエトリンジャイト、モノサルフェートまたはFriedel氏塩として固定されていた硫酸塩や塩化物がイオン解離する。これに伴って、炭酸化部と未炭酸化部において硫酸イオンや塩化物イオンに濃度差が生じ、濃度拡散によってこれらのイオンが移動するとともに、アルカリ金属イオンの逆拡散が起こる。この結果、塩化物イオンや硫酸イオンの濃縮が生じる。
- これらのイオンの濃縮はそれぞれ鉄筋の腐食や炭酸化部分の脆弱化を招く。
- 5) 炭酸化に伴うセメント硬化体の細孔量の変化は、促進炭酸化試験を行った試料による場合と、実構造物から得られた試料による場合とでは傾向が異なり、前者では一般に炭酸化部分の細孔量が減少するが、後者では逆に増大する。

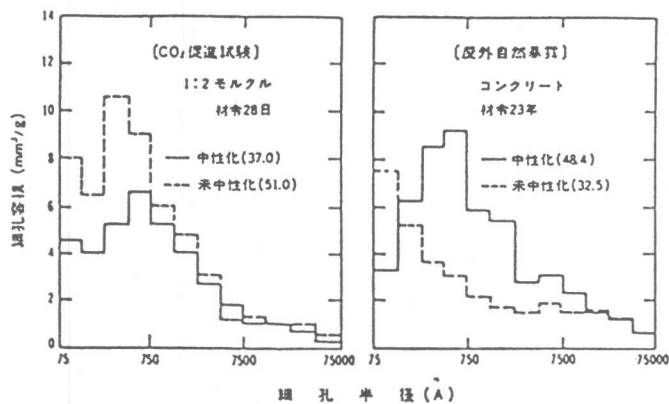
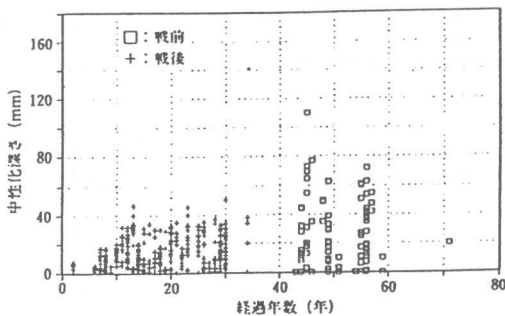
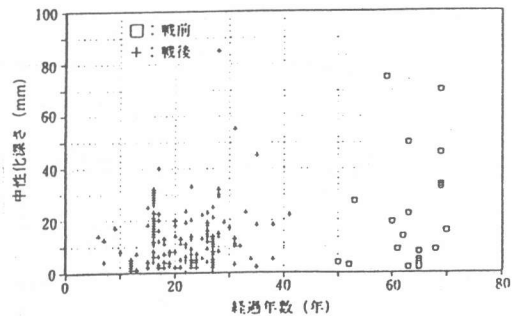


図-4 中性化による細孔径分布の変化

- 6) 炭酸化がコンクリートの強度に及ぼす影響については、促進炭酸化によって得られた試料では炭酸化によって強度が増大するという結果を得ているものが多いが、実構造物から採取された試料では逆に強度低下を起こしている事例が多い。このように室内試験（促進炭酸化槽）と自然環境において異なった結果が得られた理由は、前者では湿度条件が一定であり良く管理された環境条件であるのに対して、後者では風雨等の乾湿の繰り返しを絶えず受ける厳しい環境条件であることに起因すると思われる。
- 7) 炭酸化の進行と鉄筋腐食との関係については、フェノールフタレインによる呈色反応によって判定される炭酸化のフロントが鉄筋位置に達する前に鉄筋の腐食が始まる。これは、炭酸化の進行に伴う塩化物イオンならびに硫酸イオンの未炭酸化領域への濃縮現象によるものである。
- 8) 経過年数と中性化深さに関する実構造物の調査例では、経過年数が40~50年以上の第2次大戦前に竣工した構造物であっても、中性化が殆ど進行していないものが多く確認された。



(A) 建築構造物(屋外)



(B) 土木構造物

図-5 経過年数と中性化深さ

#### 4. 『炭酸化を受けたコンクリート構造物の判定マニュアル』について

このマニュアルの構成は以下のようになっている。

- ◆炭酸化判定マニュアルフロー(図-6)
- ◆資料調査
- ◆現地調査
- ◆コアによる中性化深さの測定
- ◆粉末X線回折法
- ◆熱分析法
- ◆偏光顕微鏡観察
- ◆C-S-Hの定量法
- ◆シリカゲルの定量法
- ◆促進炭酸化法

本マニュアルでは、炭酸化によるC-S-Hの分解を確認するための方法を、化学分析による方法(2種)、X線回折試験による簡便法、目視観察による方法など複数の方法を示している点に特徴がある。

#### 5. おわりに

炭酸化によるコンクリート構造物の劣化は今後、建物の鉄筋コンクリート基礎や橋脚基部のような比較的水セメント比の大きい配合のコンクリートにおいて無視し得ない問題になると考えられる。コンクリートの炭酸化に関する調査研究はようやく緒についた段階であって、十分な劣化対策を講じるためには、なお一層の調査研究を必要とする。この種の研究を格段に進展させるためには、コンクリート工学、セメント化学、岩石鉱物学の研究者がそれぞれ緊密な連携を保持しつつ学際的な視野に立って研究を行う必要がある。

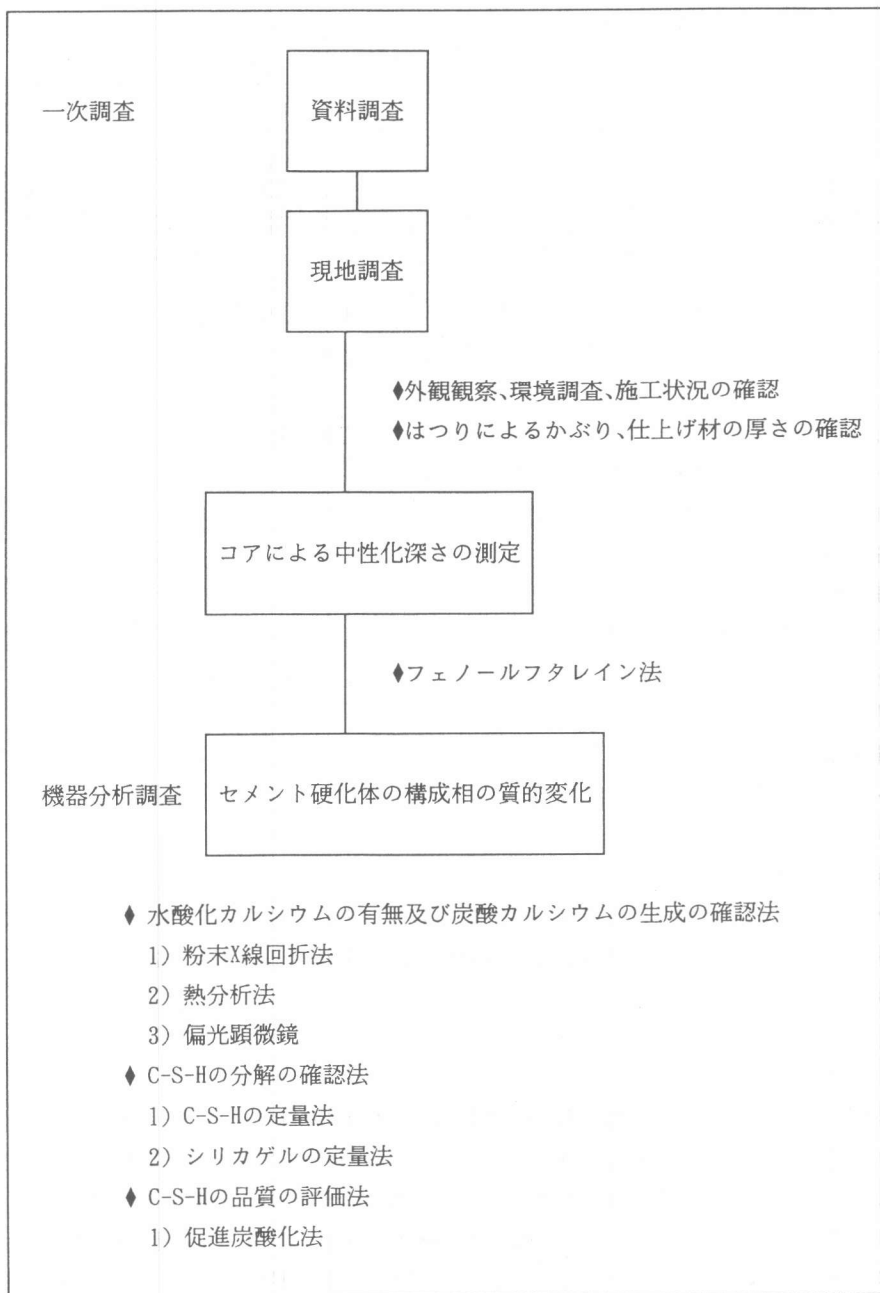


図-6 炭酸化判定のフロー