

論文

[1156] セメント水和物の炭酸化におけるファーテライトの生成

正会員 ○立松 英信 (鉄道総合技術研究所)

佐々木孝彦 (鉄道総合技術研究所)

岩淵 研吾 (鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

コンクリートの炭酸化は、耐久性を支配する最も重要な因子の一つとして昨今改めて議論されるようになり、これまでに多くの研究成果が得られている。筆者らは、セメント水和物の炭酸化に伴う変質について、主としてアルカリの影響に着目して検討を進めた結果、高濃度の炭酸ガス雰囲気での促進条件下では、アルカリが多くなるほど炭酸化は促進されることを確認するとともに、炭酸化した領域にはカルサイトのほかに、ファーテライトと呼ばれるカルサイトとは構造の異なる炭酸カルシウムが生成し、この物質はアルカリが多くなるほど生成し易くなることを明らかにした [1]。

本報告では、アルカリのほかに、従来から炭酸化を促進する要因と考えられている水セメント比や養生条件についても実験を行い、セメント水和物の炭酸化による炭酸カルシウムのキャラクターゼーションと、合成C-S-Hの促進炭酸化によるファーテライトの生成条件を検討した結果について述べる。

2. 実験

2. 1 セメントペーストの作製

実験に用いたセメントペーストは、普通ポルトランドセメント ($\text{Na}_2\text{O}=0.21\%$, $\text{K}_2\text{O}=0.60\%$) を使用し、所定のアルカリ量で1辺が20mmの立方体の型枠に打設した後、翌日脱型しそのまま水中養生を行う手順で作製した。アルカリ量はセメント重量に対して3水準 ($0.6\%\text{R}_2\text{O}$ 、 $1.2\%\text{R}_2\text{O}$ 、 $1.6\%\text{R}_2\text{O}$) とし、その調整は混練水に試薬の水酸化ナトリウムを添加することで行った。水セメント比は40%、50%、60%、水中養生期間は7日、28日とした。

2. 2 C-S-Hの合成

C-S-Hの合成は鈴木ら [2] の方法に準じて行った。すなわち、0.01モルの水酸化カルシウム溶液と0.444モルの珪酸エチル溶液を用いて室温で7日間攪拌し、吸引濾過により分離・洗浄して試料とした。

2. 3 促進炭酸化試験

種々の条件で作製したセメントペーストの促進炭酸化は、朝日科学製アサヒ・ルネイアー CO_2 環境試験槽を使用し、温度 30°C 、相対湿度40%、炭酸ガス濃度20%の条件で行った。これらの炭酸化深さは、所定期間促進炭酸化した後ほぼ中央で割断し、その面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して赤く呈色しない領域の平均の深さとした。この領域をできるだけ注意深くサンプリングした部分を試料とし、粉末X線回折によって炭酸カルシウムのキャラクターゼーションを行った。なお、試料は破碎後アセトンで脱水し、真空乾燥してから測定に供した。

また、合成C-S-Hについても、前述の条件で2~4日促進炭酸化期間を経過した後、炭酸カルシウムの同定を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 炭酸化速度に及ぼすアルカリ、水セメント比、養生の影響

炭酸化速度に及ぼすアルカリ、水セメント比、養生条件の影響を検討するため、これらの条件を変化させて作製した試料を促進炭酸化させ炭酸化深さの経時変化を調べた結果は図-1~3に示すとおりである。いずれの場合でも、促進炭酸化期間が長くなるに従って炭酸化深さが増加することは当然のこととして、さらに、①アルカリ量が多い、②水セメント比が高い、③水中養生期間が短いほど炭酸化は促進されることが判る。これらの実験事実はこれまでに報告された多くの研究成果とよく一致しており、とりわけ、水セメント比が高くなることによる影響は大きいと考えてよい。

3. 2 炭酸化域のキャラクタリゼーション

炭酸化速度の異なるセメント硬化体の変化過程を検討するため、種々の条件で作製した供試体を炭酸化促進試験装置を用いて14日間促進炭酸化を行い、炭酸化域の試料を採取して粉末X線回折により構成成分を調べた。

第一に、アルカリ量を変えた試料（水セメント比40%、水中養生期間7日）の炭酸化域を構成する成分の変化を図-4に示す。なお、以下に示す粉末X線回折結果（図-4~6）の図においては、それぞれの物質に固有の回折線のうち最強ピークの回折強度をプロットした。

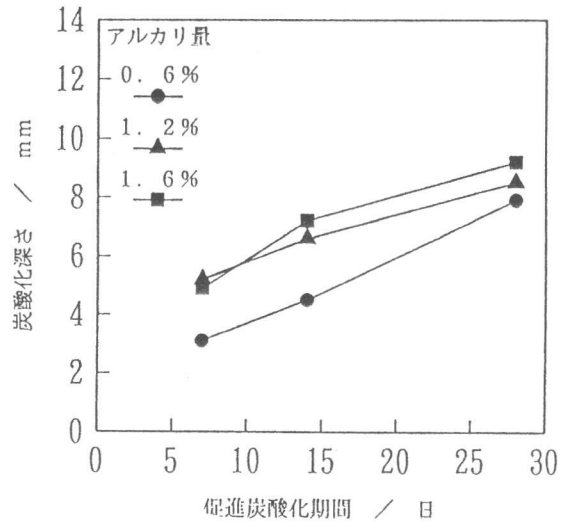


図-1 アルカリ量が異なる場合の炭酸化深さの経時変化

(水セメント比：40%、水中養生期間：7日)

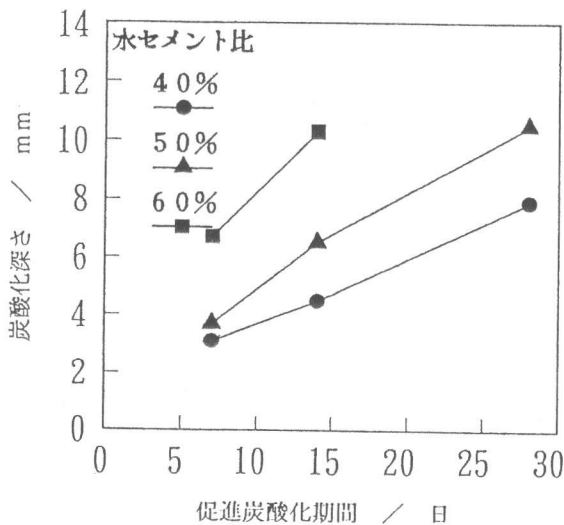


図-2 水セメント比が異なる場合の炭酸化深さの経時変化

(アルカリ量：0.6%、水中養生期間：7日)

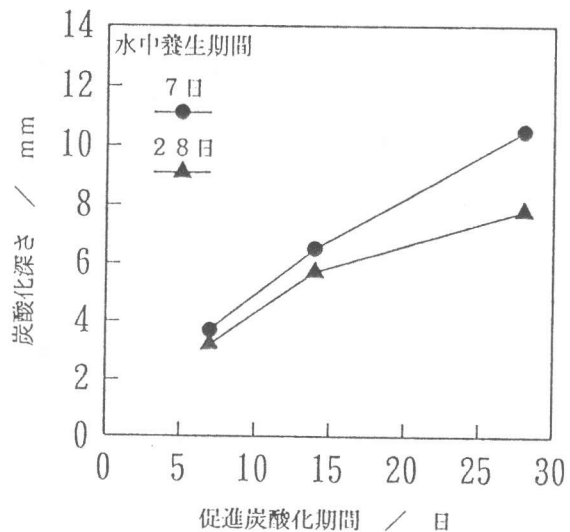


図-3 水中養生期間が異なる場合の炭酸化深さの経時変化

(アルカリ量：0.6%、水セメント比：50%)

アルカリが少ない(0.6%R₂O)場合は、カルサイトのほかにアラゴナイトが検出され、極く少量の水酸化カルシウムも認められる。アルカリ量が多くなると、カルサイトが増加し水酸化カルシウムは検出されない。この場合の最も大きな違いはアラゴナイトが消失しこれに代わって新たにファーテライトが検出されることである。

第二に、水セメント比を変えた試料(アルカリ量0.6%R₂O、水中養生期間7日)の炭酸化域を構成する成分の変化を図-5に示す。

水セメント比が低い(40%)場合は、カルサイトのほかにアラゴナイトが検出されるが、水酸化カルシウムもまだ少量残存している。水セメント比が高くなると、カルサイトが増加し水酸化カルシウムは減少するが、ここで特徴的なことはファーテライトが現れることである。

また、セメント硬化体の性質は養生にも大きく影響されることが指摘されており、アルカリ量と水セメント比を固定して水中養生期間を比較したのが図-6である。水中養生期間7日では、カルサイトのほかアラゴナイトとファーテライトが共存するが、28日ではファーテライト相が消失している。

従って、セメント硬化体として、アルカリが少なくかつ水セメント比が低いような高品質のものは、促進炭酸化によってカルサイトとアラゴナイトに、アルカリが多かったり、水セメント比が高いような低品質のものは促進炭酸化によってカルサイトとファーテライトに変化すると考えられる。

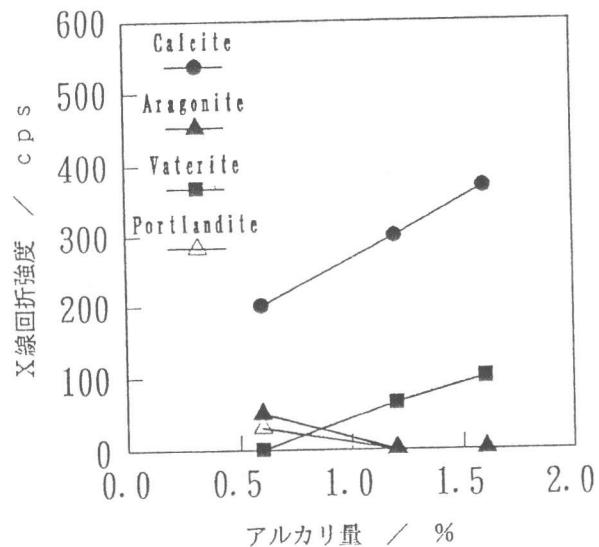


図-4 アルカリ量が異なる場合の炭酸化域の粉末X線回折結果
(水セメント比: 40%、水中養生期間7日)

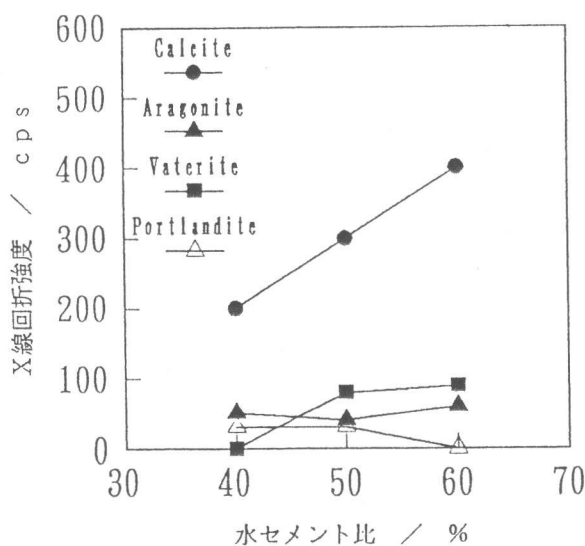


図-5 水セメント比が異なる場合の炭酸化域の粉末X線回折結果
(アルカリ量: 0.6%、水中養生期間: 7日)

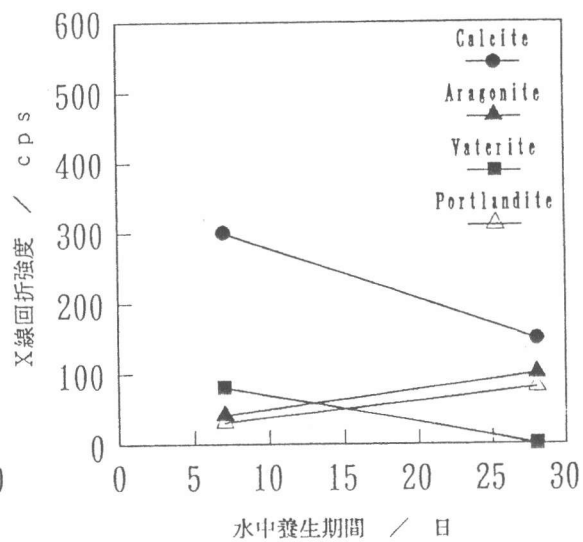


図-6 水中養生期間が異なる場合の炭酸化域の粉末X線回折結果
(アルカリ量: 0.6%、水セメント比: 50%)

3. 3 合成C-S-Hの促進炭酸化

セメント硬化体の促進炭酸化ではカルサイトのほかにアラゴナイトとファーテライトが生じ、ファーテライトは主としてC-S-Hの炭酸化によって生じたものと考えられることを既に報告した[1]。

そこで、ファーテライトの生成起源を明らかにするため、組成を変化させた2種類のC-S-Hを合成し、促進炭酸化に伴う構成成分の変化を粉末X線回折により調べた結果を図-7に示す。けい光X線分析により求めた化学組成からCaO/SiO₂比は、(a)では0.5、(b)では1.1の合成物であり、赤外吸収スペクトルの結果からも鈴木らの報告と一致し、C-S-Hであることを確認した。

それぞれの試料について、促進炭酸化の前後を比較すると、(a)の低カルシウムC-S-Hでは、促進炭酸化2日目、(b)のC-S-Hでは、促進炭酸化4日目で、それぞれファーテライトが生成した。

この実験結果から、C-S-Hを促進炭酸化させると明らかにファーテライトが認められるようになり、低カルシウムのC-S-Hほど炭酸化し易くなることが明らかになった。

4. まとめ

種々の条件で打設したセメントペーストを促進炭酸化し、炭酸化域を構成する成分の変化を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

①炭酸化速度が速いセメント硬化体は、促進炭酸化によってカルサイトとファーテライト、逆に、遅い場合はカルサイトとアラゴナイトに変化する傾向が認められ、促進炭酸化による炭酸カルシウムのキャラクタリゼーションはセメント硬化体の品質を診断する手法として重要であることが示唆された。

②セメント硬化体の促進炭酸化に伴って生成するファーテライトの起源の一つとしてC-S-Hが考えられること、低カルシウムC-S-Hほど炭酸化し易くなることが示された。

[参考文献]

- 1) 立松英信・佐々木孝彦・小棹理子：セメント水和物の炭酸化に及ぼすアルカリの影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.669-672、1991
- 2) 鈴木一孝・西川直宏・林知延：低カルシウムC-S-Hのキャラクタリゼーション、セメント技術年報、Vol.42、pp.36-39、1988

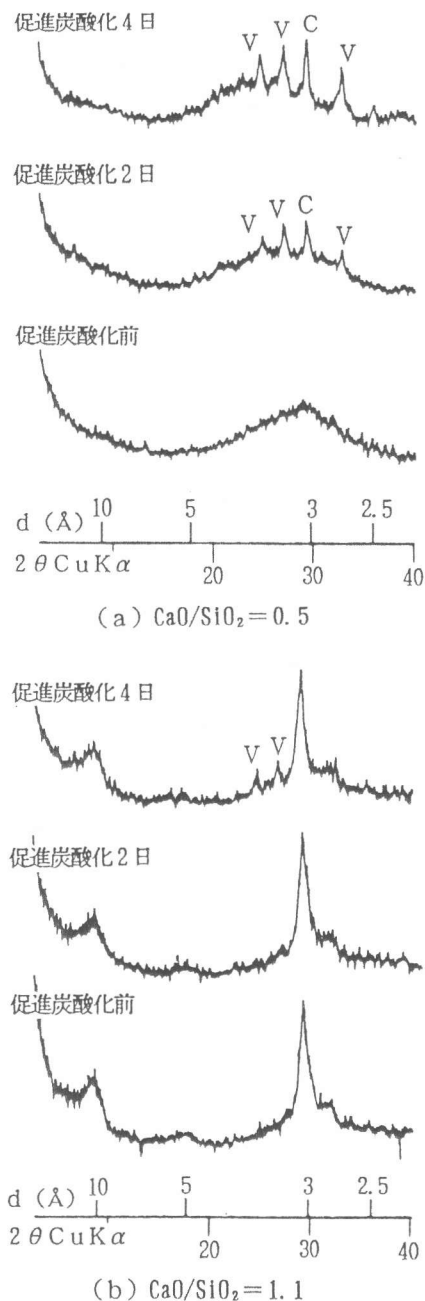


図-7 合成C-S-Hの促進炭酸化前後における粉末X線回折結果