

コンクリートの炭酸化に関する研究 (I)

Studies on Carbonation of Concrete (I)

小林 一 輔*・宇 野 祐 一*
Kazusuke KOBAYASHI and Yuichi UNO

1. は し が き

コンクリートの炭酸化に影響を及ぼす要因としては、これまでにコンクリートの水セメント比、連行空気量、セメントの種類、混和材の種類と添加量、施工（養生、締固め）および環境（温度、湿度および炭酸ガス濃度）などが明らかにされている。筆者の1人は最近、これ以外の要因としてコンクリートの孔隙水のpHとその移動があること、コンクリートの炭酸化は構造物におけるアルカリの濃縮現象やエフロレッセンスと深く関連があること、炭酸化がC-S-H組織の分解にまで進行する例があること、などを指摘した。本研究は以上の諸点に関して基礎的な裏付けを行うことを目的として実施したもので、今回は炭酸化の速度に及ぼす孔隙水のpHとその移動との関係を明らかにするために実施したモルタルによる促進炭酸化試験の結果を報告する。

2. 実 験 方 法

供試体はφ5×10cmの円柱体であって、モルタル中のアルカリ量を変えるために、普通ポルトランドセメントA (R₂O=0.57%)を用いて、等価Na₂O量を、NaOHを添加して0.9%、1.2%および1.5%に変化させた。また、1部の実験にはR₂O=0.31%のセメントBを使用した。なお、孔隙水の移動をシミュレートするために、図-1および写真-1に示すように、円柱供試体の中心部に直径8mmの中空部分を設け、そこに促進炭酸化の期間を通じて、pH=7および13の水を供給した。なお、使用したセメントの化学成分を表-1に示す。細骨材には豊浦標準砂を用いた。モルタルの配合は水セメント比を40%、50%

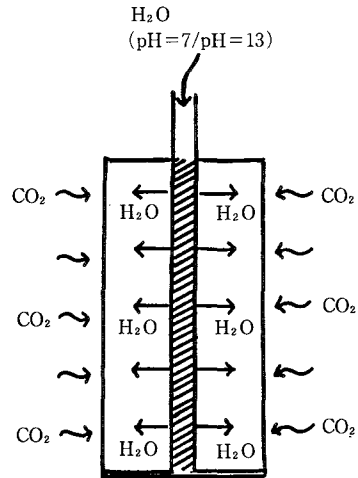


図-1 孔隙水の移動をシミュレートした供試体

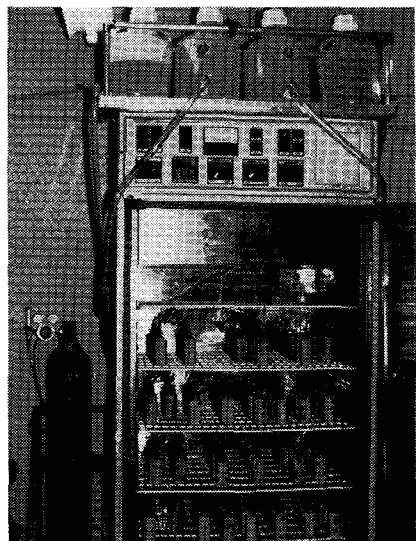


写真-1 促進炭酸化試験状況

表-1 セメントの化学組成 (%)

	ig·loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
A	1.1	22.1	4.8	2.9	64.9	1.4	1.9	0.24	0.50	0.57
B	0.7	21.2	5.7	3.4	64.3	1.8	1.9	0.16	0.23	0.31

*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

および60%の3種とし、それぞれフロー値が180mmとなるように単位水量を設定した。

供試体は打込み後、温度20°Cの噴霧養生室で28日間湿潤養生を行った後、炭酸化促進試験槽(朝日科学:ルネイヤー)を用いて、CO₂濃度10%、温度20°C、湿度60% R.H.の条件下に所定の日数保存したのち、呈色反応(フェノールフタレイン1%エタノール溶液)によって炭酸化深さを測定した。さらに一部の供試体については水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の測定ならびに熱分析(DTA)を行った。なお、炭酸化深さは円柱体の圧裂試験を行った直後に、その破断面に溶液を吹付け、非発色部の面積を画像解析装置を用いて測定し、求めた。非発色部がCaCO₃に変わっているか否かをチェックするために、偏光顕微鏡観察も行っている。

3. 実験結果と考察

図-2はW/C=50%、R₂O=0.57%の場合の平均炭酸化深さを1とした場合の各条件の平均炭酸化深さの比を炭酸化比として示したものであって、促進炭酸化8週における結果である。この図から明らかなように、水セメント比が一定の場合には、炭酸化はほぼR₂Oの値の増加とともに増大しており、この傾向は水セメント比が60%の場合に顕著にみられる。各水セメント比ごとに、R₂O=0.57%の場合を基準にして、R₂O=1.2%の場合の炭酸化の進行度を比較すると、W/C=40%の場合が約7倍、50%の場合が2倍、60%の場合が1.7倍程度となり、アルカリが炭酸化を促進していることを示している。

一方、図-3は孔隙水の移動をモデル化した供試体による実験結果を、図-2のW/C=50%の場合と対比して示したもので、炭酸化比は図-2の場合のW/C=50%、R₂O=0.57%の場合を基準にとっている。

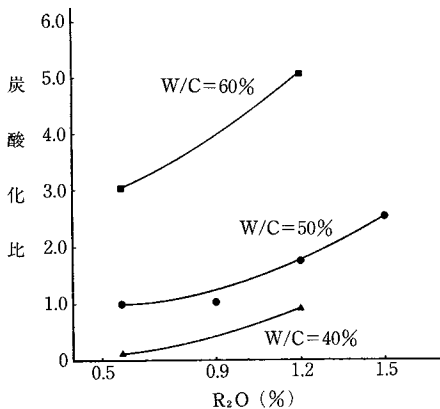


図-2 アルカリと炭酸化比との関係

この図から明らかなように、セメントのR₂O量がいわゆる、低アルカリセメントの範囲にある場合には普通供試体とほぼ同程度の炭酸化を示しているが、R₂Oの値が増大するとともに炭酸化は急激に進行し、普通供試体の炭酸化の進行との差が大きくなる。たとえば、R₂O=1.5%の場合の炭酸化比は普通供試体の場合は約2.5であるが、pH=7の人工孔隙水を供給する供試体ではこの値が約5となる。

図-3に示したような、孔隙水の移動をモデル化した供試体を用いた場合に炭酸化が異常な速度で進行する理由は孔隙水のpHの高い状態が持続するためであると考えられ、前述の推論が裏付けられたことになる。図-4はR₂Oが1.5%の場合についての促進炭酸化期間と平均炭酸化深さとの関係を示したものである。この図で注目されるのは人工孔隙水のpHが7の場合と13の場合では炭酸化の進行速度が異なることである。

pH=13の場合には初期の炭酸化速度はpH=7の場合

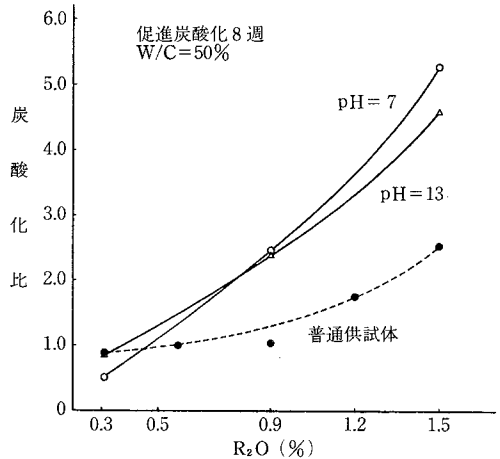


図-3 アルカリと炭酸化比(孔隙水供試体)

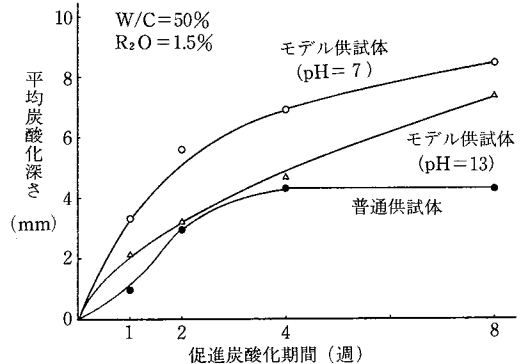


図-4 炭酸化の条件が平均炭酸化深さに及ぼす影響

に比べて小さいが、次第にその速度が大きくなり、少なくとも促進炭酸化 2 週以後は直線的に炭酸化が進行している。この状態で推移するならば、炭酸化深さは pH=7 の場合よりも大きい値となることが予想される。pH=7 の人工孔隙水を用いた場合の炭酸化性状は孔隙水の移動により、供試体内部に存在している可溶性アルカリが表面に向かって濃縮を生じたためと考えられる。

このことは、炭酸化は初期には促進されるが、これがある深さに達すると速度が小さくなる理由を説明している。

pH=13 の人工孔隙水を用いた場合の炭酸化挙動は、この pH の値が炭酸化の影響を顕著に受けない状態における供試体中の孔隙水の pH の値とほぼ同じ値とみなすことができるので、とくにアルカリの濃縮現象を生ずることなく、長期にわたって孔隙水の pH を高い値に保つことによるものであると考えられる。なお、図-5 は R₂O が 0.9% の場合について促進炭酸化期間と平均炭酸化深さとの関係を示したものであるが、図-4 と同様な傾向が認められる。

さて、図-3~5 のような孔隙水の移動をとまなう条件下における炭酸化が特異なものであるのか否かを確かめるために、炭酸化部と非炭酸化部の細孔構造を調べたものが図-6 である。

この図より、20 Å ~ 1 × 10⁵ Å までの全細孔量は炭酸化によって減少しており、さらに細孔半径に関しては約 400 Å ~ 1 × 10⁴ Å の範囲の細孔が著しく減少し、これ以上の粗大な細孔が増大している。この傾向は屋外に 5 年間暴露した供試体による依田の試験結果¹⁾と大略一致しており、図-3~5 に示したような結果が、実際の構造物に生ずる炭酸化現象を再現しているものと考えられる。

なお、参考のため、R₂O=1.5% の普通供試体を用いた場合の炭酸化部分と非炭酸化部分の細孔構造を比較した結果を図-7 に示す。この図から普通供試体の場合にも炭酸化によって全細孔量が著しく減少することが認められ、

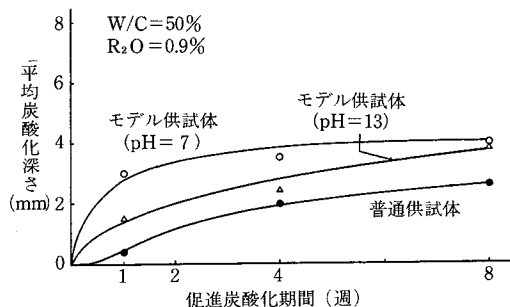


図-5 炭酸化の条件が平均炭酸化深さに及ぼす影響

研究速報
また既往の研究²⁾によって指摘されているように、炭酸化の影響は 200 Å ~ 1 × 10⁵ Å の範囲の細孔に顕著に認められる。

コンクリートの炭酸化に影響を及ぼす要因のうち、コンクリートの品質に関連するものとしてはまず水セメント比があげられる。この要因と本文で明らかにしたアルカリ量のいずれが炭酸化に関して卓越した要因になるかが論議の対象となろう。この点に関しては、少なくとも普通供試体に関しては、図-2 および図-8 の比較より明らかに水セメント比の要因が卓越しているようにも思われる。

図-9 は普通供試体について、呈色反応による発色部分と非発色部分の熱分析を行った結果であるが、非発色部分には Ca(OH)₂ の存在が認められず、すべて CaCO₃ に変化しているのに対し、発色部分には 1 部 Ca(OH)₂ が存在

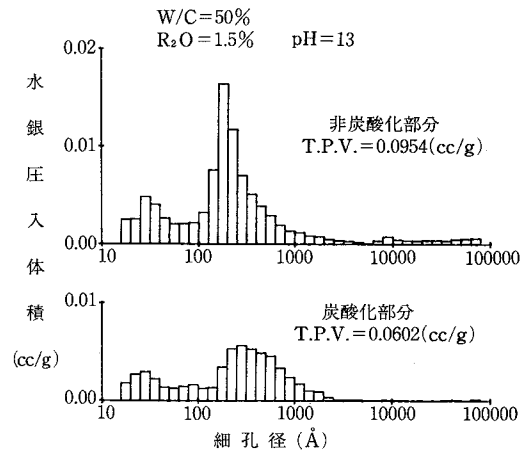


図-6 炭酸化部と非炭酸化部の細孔構造 (孔隙水供試体)

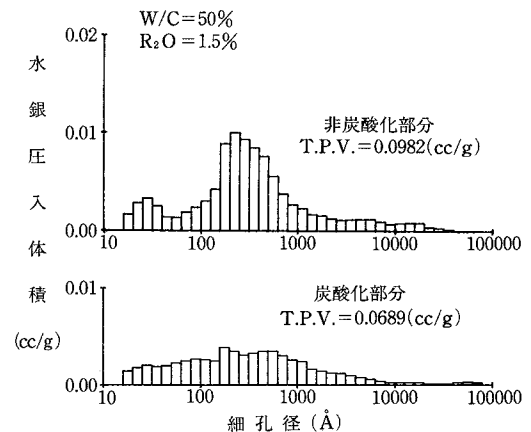


図-7 炭酸化部と非炭酸化部の細孔構造 (普通供試体)

研 究 速 報

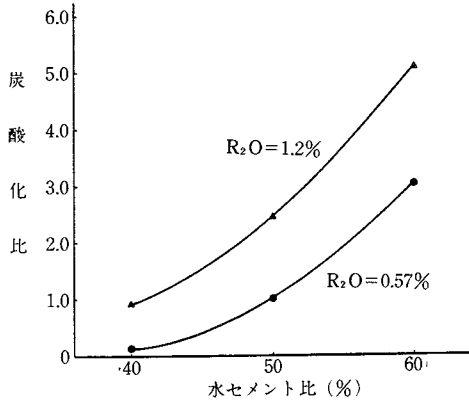


図-8 炭酸化深さと水セメント比

しており、発色部分が全く非炭酸化しているのではないことを示しているが、この点についての詳細な検討は後日にゆずりたい。

4. む す び

本文はコンクリートの炭酸化速度を支配する要因として、孔隙水の pH とその移動があることを、促進炭酸化試験を通じて明らかにしたものである。

(1988年3月4日受理)

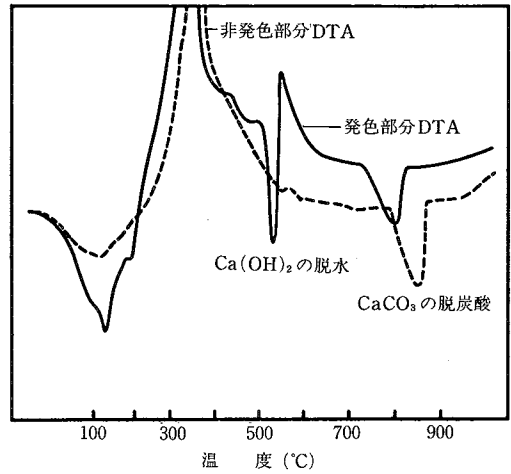


図-9 熱分析試験結果

参 考 文 献

- 1) 依田彰彦：第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 41~44, 1982
- 2) Philajavaara, S.E., Materials and Construction, Vol. 1, No. 6, pp. 521~528, 1968