

論文

[1115] 炭酸ガス濃度がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響

正会員○高田良章（藤沢薬品工業筑波コンクリート研究所）

正会員 魚本健人（東京大学生産技術研究所）

1. はじめに

近年、コンクリートの早期劣化が指摘されており、早急な耐久性改善策が強く求められている。コンクリートの中性化もその一つであり、今まで数多くの研究成果が報告されている。

一般に、中性化に対する耐久性を評価する場合、従来から促進中性化試験が行われている。しかし、これは同一試験条件において、どの材料が中性化に対して抵抗性があるかの比較はできるが、自然環境下から何倍の速度で中性化が進行しているかについては十分明らかとされておらず、自然環境下と関連付けた研究例は数少ないのが現状である。そこで、本研究はコンクリートの中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度に着目し、3種の異なる炭酸ガス濃度環境下において中性化試験をしたコンクリートについて、圧縮強度、重量減少率等の性状を調べると同時に、炭酸ガス濃度がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響について検討したものである。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は秩父両神産碎石（最大寸法；20mm、表乾比重；2.69、FM；6.80）、細骨材は大井川産川砂（表乾比重；2.60、FM；2.86）を使用した。コンクリートは目標スランプ8cm、単位水量一定のプレーンコンクリートとし、水セメント比は70%、60%、50%とした。表1にコンクリートの配合を示す。

作製した供試体（ $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ ）は、初期水中養生期間を0日及び5日とした。初期養生後は温度20℃、湿度55%を一定とした試験室（槽）内で、炭酸ガス濃度を実測値で0.07%（屋内自然暴露）、1.0%及び10%（促進中性化）の環境下に静置した。その後所定の材令にて圧縮強度、弾性係数、重量減少率及び中性化深さの測定を実施した。圧縮強度については、比較対照として標準水中養生を施した供試体も同時に試験した。

中性化深さの測定は、圧縮強度試験を終了した供試体（ $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ ）を割裂し、直ちにその破断面にフェノールフタレイン1%溶液を吹き付け、非発色面を測定した。

3. 実験結果及び考察

1) コンクリートの強度性状

水セメント比60%の圧縮強度の経時変化を図-1に示す。10%の炭酸ガス濃度で促進中性化したものは、標準水中養生時強度より高く、明らかに中性化による強度の増大が認められた。また、初期養生0日と5日のものが材令に伴ってほぼ同程度の強度であるのは、同一材令における中性化深さが異なるためと考えられる。一方、屋内自然暴露したもので

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg/ m ³)				初期 養生 期間
		W	C	S	G	
70	49	184	263	927	959	0日 及び 5日
60	47		307	872	978	
50	45		368	813	987	

は初期養生0日及び5日間の両者とも材令4週あるいは8週以降ほぼ一定の値となった。これは乾燥により水分の蒸発が著しく、水和反応が不完全である極表層部で炭酸化反応が起こっているため、材令26週まででは中性化による強度増加が生じなかったものと思われる[1], [2]。以上のことは、水セメント比が70%、50%の場合も同様の傾向を示した。

2) コンクリートの重量変化

中性化試験開始時からの、水セメント比60%の炭酸ガス濃度の違いによる重量変化の結果を図-2に示す。同一温度、湿度環境下にもかかわらず、炭酸ガス濃度が高いほど重量減少率が低い結果となった[3]。無論、炭酸化反応により、分子量44の炭酸ガスを吸収して分子量18の水を放出するため、この差分だけ重量増加が起こるが、この密度増による影響以外に真の水分逸散量が異なるためと考えられる。

3) コンクリートの中性化深さ

図-3に、炭酸ガス濃度の違いによる中性化深さの経時変化の一例を示す。一般に、中性化深さは材令の平方根に比例するとされているが本研究で行った中性化試験においても炭酸ガス濃度の違いにかかわらず、ほぼ材令の平方根に比例することが確認された。これは、水セメント比、初期養生条件にかかわらず同様の傾向を示した。これより、炭酸ガス濃度を高めた促進中性化試験においても、中性化深さは炭酸ガスの拡散に支配されていると思われる。また、10%の炭酸ガス濃度で促進試験した場合と同じ中性化深さとなる時間は、屋内自然暴露では約35倍、1%で促進試験したものでは約7倍となった。ここで、図-3の直線の傾きを中性化速度係数とし、屋内自然暴露したものを1としたときの各濃度の比を図-4に示す。水セメント比、初期養生条件にかかわらず、ほぼ一定の比率を示している。この比率が炭酸ガス濃度による中性化速度に及ぼす影響であると考えられる。

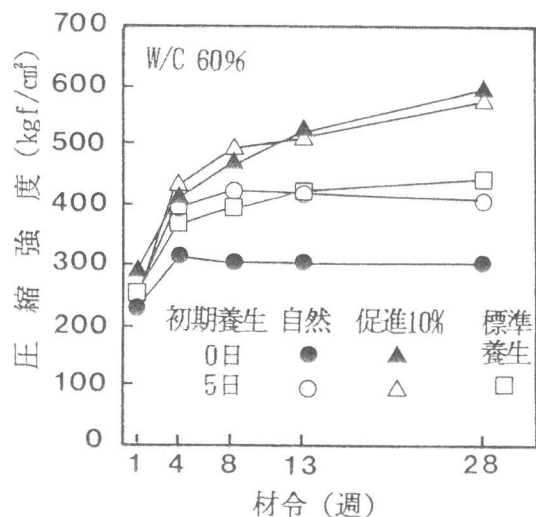


図-1 圧縮強度の経時変化

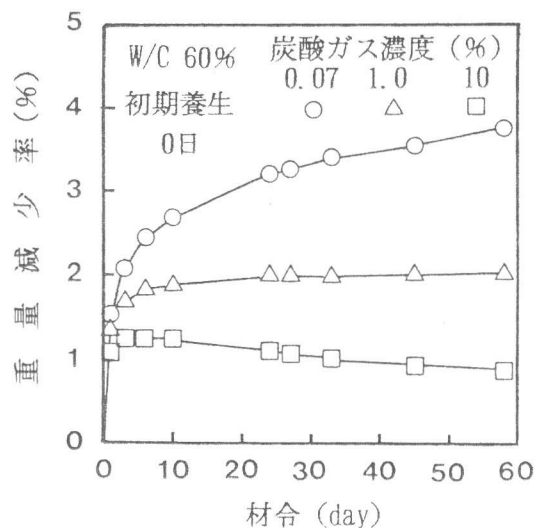


図-2 重量減少率の経時変化

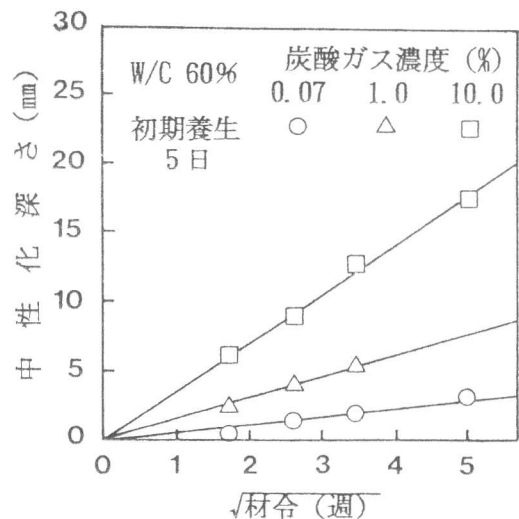


図-3 中性化深さの経時変化

4) 炭酸ガス濃度がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響

ある濃度 (C) の炭酸ガスが、定常状態でのコンクリート中への拡散によって中性化が生じると仮定すると次式が成り立つ[4]。

$$dX/dt = k \cdot C/X \quad (\text{式1})$$

(ここに、Xは中性化深さ、tは経過時間、

kは比例定数、Cは炭酸ガス濃度)

この式1をC₁を定数として積分すると次式が得られる。

$$X^2 = k \cdot C \cdot t + C_1 \quad (\text{式2})$$

ここで、時間0のとき (t=0)、中性化深さが0 (X=0) であるため、次式で表される。

$$X = k\sqrt{C \cdot t} \quad (\text{式3})$$

従来の中性化速度式は、自然環境下での速度式であり、大気中の炭酸ガス濃度は常に一定値であるため、炭酸ガス濃度の項が入っていない。式中のCを定数とした場合、従来の式が得られる。

以上の考えをもとに著者らは、炭酸ガス濃度の違いによりコンクリートの性状が変化しない場合、コンクリートの中性化深さは $\sqrt{C \cdot t}$ に比例すると考え、屋内自然暴露したものを1としたときの比例定数kを求めた。その結果を図-5に示す。図に示すように、kの値は一定とはならず炭酸ガス濃度が高いほど小さくなる傾向を示した。これは、明らかに炭酸ガス濃度の違いにより炭酸ガスが通過する部分のコンクリートの品質に変化が生じたためと考えられる。これは先に述べように、炭酸ガス濃度が高いほど炭酸化反応によりコンクリートの表層部から緻密になり圧縮強度が増大すること、また、その結果コンクリート内部からの水分の逸散が抑制され、コンクリートの重量変化が小さくなること等の理由により炭酸ガスがコンクリート中に拡散しにくくなるためと考えられる。

そこで、このkの値を炭酸ガス濃度の関数として、Cが0.07%の時に1となるように以下の式(実験式)で表した。

$$k = (0.742 - 0.224 \log C) \quad (\text{式4})$$

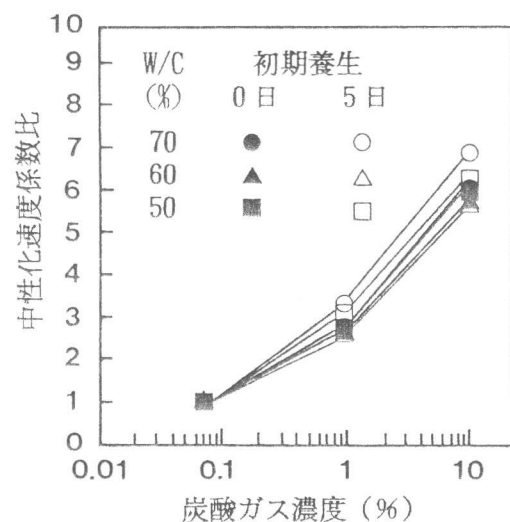


図-4 炭酸ガス濃度と中性化速度係数比との関係

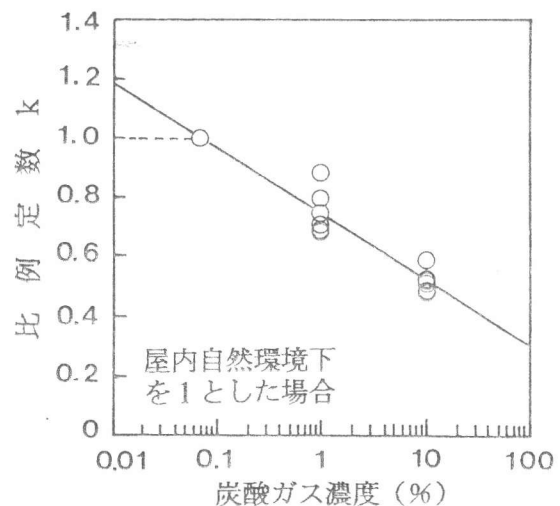


図-5 炭酸ガス濃度と比例定数kとの関係

以上のことより、屋内自然暴露（Cが0.07%と仮定）での中性化深さを基準として、従来の中性化速度式に炭酸ガス濃度の要因を加えた速度式は以下の通りとなる。

$$X = (0.742 - 0.224 \log C) A \sqrt{(C/0.07) \cdot t}$$

$$= (2.804 - 0.847 \log C) A \sqrt{C \cdot t} \quad (\text{式5})$$

（ここにAは屋内自然環境下でのセメント及び骨材の種類等の要因を含んだ従来の中性化速度係数を示す。但し、温度は20℃）

従来、促進中性化試験を行った場合、炭酸ガス濃度による比例定数が、式5に示すAの中に加わっていたため、促進中性化試験が自然環境下の何倍の速度で行われていたかが明らかとされなかったが、式5より、促進中性化試験での炭酸ガス濃度がわかれば自然環境下での何倍の速度で促進しているかが推定できると考えられる。また、式5は炭酸ガス濃度が0.07%の屋内自然環境下を基準とした場合の式であるが、式5より屋外自然環境下（炭酸ガス濃度0.034%）と同じ中性化深さとなる屋内の時間は、炭酸ガス濃度による影響については約1.8倍となる。

図-6に、同一試験条件で、屋内自然環境下と促進試験の中性化速度を比較した数少ない既往の実験結果との比較を示す。図に示すようにほぼ著者らが提案した実験式にのっているのがわかる[5],[6]。

4. まとめ

炭酸ガス濃度の違いによるコンクリートの品質の変化を炭酸ガス濃度の関数として表すことにより、従来の中性化速度式に炭酸ガス濃度の要因を含んだ中性化速度式を提案した。これにより、炭酸ガス濃度の違いによる自然環境下と促進中性化試験との対比が可能となったと考えられる。今後は、中性化速度におよぼす温度の影響等について検討する予定である。

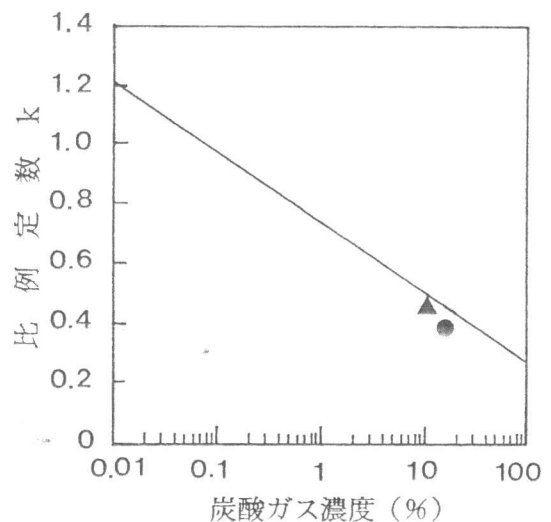


図-6 既往の実験結果との比較

参考文献

- [1] 魚本健人 ; コンクリートと養生, ダム技術 No. 43, 1990
- [2] 谷川, 森, 木村 ; モルタルの内部強度分布に関する研究, セメント技術年報 38, 1984
- [3] 依田彰彦 ; コンクリートと水及び空気 (2) 中性化, コンクリート工学 17[11], 1979
- [4] 魚本, 河合 ; アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化予測に関する基礎的研究, コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム 論文集, 1988, 4
- [5] 浜田 稔 ; コンクリートの中性化と鉄筋の腐食, セメントコンクリート No. 272, 1969
- [6] 森, 白山, 畠 ; 高炉セメントコンクリートの炭酸化について, セメント技術年報 26, 1972