

# コンクリートの中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度の影響

Influence of Concentration Carbon Dioxide on Carbonation Ratio of Concrete

魚 本 健 人\*・高 田 良 章\*

Taketo UOMOTO and Yoshiaki TAKADA

## 1. は し が き

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、内外を通じて今まで数多くの研究成果が報告されている。従来、コンクリート構造物中の鉄筋は、コンクリートの高アルカリ環境下によって保護されているが、大気中の炭酸ガスがコンクリート中へ拡散することによって徐々に中性化され、内部の鉄筋まで達すると鉄筋は腐食しやすくなる。したがって、コンクリートの中性化はコンクリート構造物の耐久性を知る上できわめて重要な現象である。一般に、中性化に対する耐久性を評価する場合、自然環境下では長い年月をかけて中性化が進行するため、炭酸ガス濃度を高めた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下において、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、自然環境下の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にされておらず、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。本文は、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、異なる3種の炭酸ガス濃度環境下で中性化試験を行い、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、従来の中性化速度式<sup>1)~3)</sup>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ものである。

## 2. 従来の中性化速度式

コンクリートの中性化速度に影響を与える要因としては、温度、湿度、炭酸ガス濃度等の環境条件に起因するものと、セメントや骨材の種類、混和材の種類とその添加量、水セメント比、養生条件および締め固めなどによる材料、配合および施工条件に起因するものとに大別される。

\*東京大学生産技術研究所 第5部

従来の中性化速度式は、コンクリート表面からの中性化深さは経過時間の平方根に比例するという次式で表されている<sup>4)</sup>。

$$X = A \sqrt{t} \quad (\text{式 } 1)$$

(ここに、Xは中性化深さ、tは経過時間、Aは中性化速度係数を示す)

式1は通常、 $\sqrt{t}$ 則と呼ばれ、最も一般的に用いられている。式中のAは先に述べた中性化速度に及ぼす各種要因について実験的に求めた係数である。しかし、この速度式は、自然環境下を対照としており大気中での炭酸ガス濃度が常に一定値であるため炭酸ガス濃度の要因が含まれていない。また、セメントや骨材等の材料的要因についてもその種類別の中性化係数が与えられているが、実際使用するセメントの銘柄や骨材の物性値が異なれば当然中性化速度も異なってくると思われる。たとえば、同じ普通ポルトランドセメントを使用しても、セメント中のアルカリ量が多いと中性化が速く進行するという研究報告もある<sup>5)</sup>。したがって、従来速度式は実験的に求めた係数を用いたごく一般的な中性化速度推定式である。以上のことより、実際使用する材料を用いて促進中性化試験を行い、その結果より自然環境下での中性化速度を推定することはきわめて重要なことであると考えられる。

## 3. 実 験 方 法

### 3-1 使用材料およびコンクリートの配合

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砕石(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。

研究速報

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				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	

3-2 試験体および測定

コンクリート試験体は、直径10cm、高さ20cmの円柱供試体で、脱型後初期水中養生期間を0日および5日とした。初期水中養生後は温度20°C、湿度55%を一定とした試験室(槽)で、炭酸ガス濃度を実測値で0.07% (屋内自然暴露)、1.0%および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中性化深さの測定を実施した。中性化深さの測定は、試験体を10×20cmの破断面が得られるように割裂し、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、非発色面を中性化部として測定した。

4. 実験結果および考察

4-1 コンクリートの中性化深さ

図-1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。式1に示したように、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、本実験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

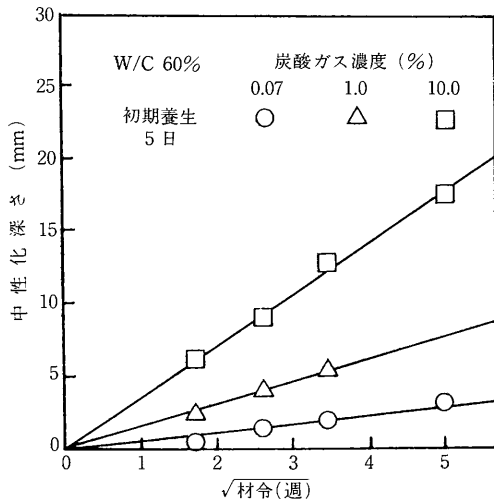


図-1 中性化深さの経時変化

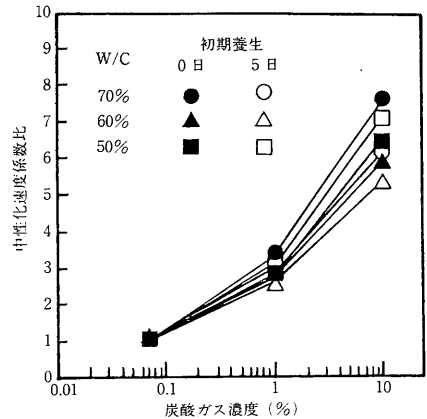


図-2 炭酸ガス濃度と中性化速度係数比との関係

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よって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は約7倍となった。ここで、こ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-2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。これは温度、湿度等が一定の条件での実験結果であることから、この比率が炭酸ガス濃度による中性化速度におよぼす影響であると考えられる。

4-2 炭酸ガス濃度がコンクリートの中性化速度におよぼす影響

ある濃度(C)の炭酸ガス濃度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<sup>9)</sup>。

$$dX/dt = k \cdot C / X \quad (式2)$$

(ここに、Xは中性化深さ、tは経過時間、kは比例定数、Cは炭酸ガス濃度を示す)

この式2をC<sub>1</sub>を定数とし、積分して微分方程式を解くと次式が得られる。

$$X^2 = k \cdot C \cdot t + C_1 \quad (式3)$$

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。

$$X = k \sqrt{C \cdot t} \quad (式4)$$

従来の中性化速度式は、先にも述べたように自然環境

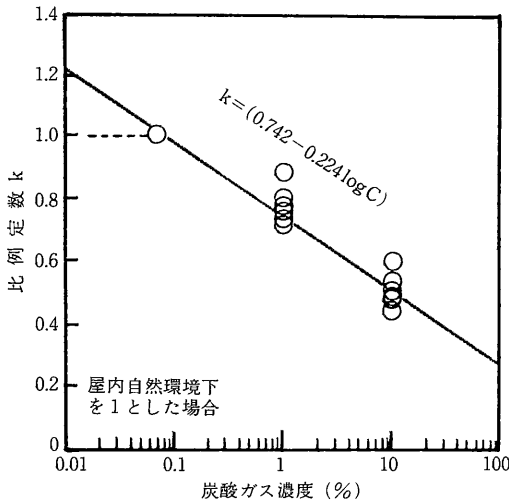


図-3 炭酸ガス濃度と比例定数 k との関係

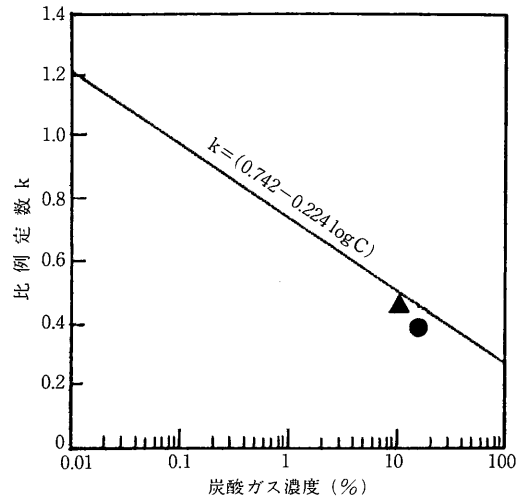


図-4 既往の実験結果との比較

下での式であり、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-3 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、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。すなわち、炭酸ガス濃度が高いほどコンクリートが炭酸ガスと反応した分だけ重量が重く、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<sup>7,8)</sup>。

ここで、式 4 における k の値は次式に示すように、環境条件に起因する項として、炭酸ガス濃度 ( $k_{CO_2}$ ) と温度 ( $k_T$ ) および湿度 ( $k_H$ ) によって表される。

$$k = k_{CO_2} \cdot k_T \cdot k_H \quad (式 5)$$

今、式 5 にある温度、湿度については一定条件であるため定数となるが、炭酸ガス濃度については、式 4 より定数である  $k_{CO_2}$  の値が先に述べた理由により定数とはならないため、この  $k_{CO_2}$  の値を炭酸ガス濃度の関数として、C が 0.07% のときに 1 となるように以下の式 (実験式) で表した。

$$k_{CO_2} = (0.742 - 0.224 \log C) \quad (式 6)$$

以上のことより、従来の中性化速度式に炭酸ガス濃度の要因を加えた中性化速度式を提案した。

$$\begin{aligned} X &= (0.742 - 0.224 \log C) A \sqrt{(C/0.07) \cdot t} \\ &= (2.804 - 0.847 \log C) A \sqrt{C \cdot t} \quad (式 7) \end{aligned}$$

(ただし、式 7 は屋内自然環境下の炭酸ガス濃度 (C = 0.07%) を代入したときに  $X = A \sqrt{t}$  が得られる式である)

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 7 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 7 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 7 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 7 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時間は、屋内では約 1.8 倍となる。ただし、これはあくまで炭酸ガス濃度のみの要因による違いであり、その他の環境条件である温度、湿度が、促進中性化試験条件と同じであると仮定した場合である。実際には、屋外自然環境下でのコンクリートは気温の変化や雨などによる乾湿の繰り返しを受けるため、中性化の進行が抑制されることが知られている<sup>9)</sup>。しかし、少なくとも従来の中性化速度式にある屋内と屋外の炭酸ガス濃度の違いによる影響と雨などによ

研究速報

る乾湿の繰り返しによる影響を両方考え併せた実験的に求めた中性化係数の内、炭酸ガス濃度による影響は明らかになったと考えられる。

図-4に、屋内自然環境下と促進試験の中性化速度を比較した既往の実験結果との比較を示す。図に示すようにデータ数は少ないが、ほぼ著書らが提案した実験式にのっているのがわかる<sup>4)10)</sup>。

以上のことより、促進中性化試験はどの材料が中性化に対して抵抗性があるかの比較ばかりでなく、対象となる構造物と同じ材料を使用し、同じような締め固めを施して促進中性化試験を行えば、中性化速度におよぼす数多くの要因である材料、配合および施工条件に起因する要因を取り除くことができ、より正確な自然環境下での中性化の進行を予測することができる有効な試験法であると考えられる。

### 5. おわりに

本文は、炭酸ガス濃度の違いによるコンクリートの品質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。これより、自然環境下と促進中性化試験との対比が可能になったと考えられる。

(1991年3月27日受理)

### 参考文献

- 1) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，1963
- 2) 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説，1976
- 3) 依田彰彦：高炉セメントコンクリートの中性化，セメント・コンクリート，No429，1982，11
- 4) 浜田 稔：コンクリートの中性化と鉄筋腐食，セメントコンクリート，No272，1969
- 5) 小林・宇野：コンクリートの炭酸化に関する研究(1)，Vol. No 6，1988
- 6) 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
- 8) 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
- 9) 和泉意登志ほか：既存RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について(その1～その3)日本建築学会大会，1983
- 10) 森，白山，ほか：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