

コンクリートの中酸化速度に及ぼす要因

魚本健人*・高田良章**

本研究は、炭酸ガス濃度がコンクリートの中酸化の進行に及ぼす影響について実験的に明らかにし、既往の促進中性化試験結果と比較検証したものである。その結果、炭酸ガス濃度以外の温度、水セメント比の影響も含めた中性化速度式を提案した。これより、促進中性化と屋内自然環境下における中性化の進行との相関がある程度まで説明できることを示したものである。

Keywords : durability, carbonation, carbon dioxide, concentration, temperature, water cement ratio

1. はしがき

本来、コンクリート構造物の鉄筋は、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付近まで到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の進行はコンクリート構造物の耐久性を知る上で極めて重要な現象であり、今まで内外を通じて数多くの研究成果が報告されている。すでに、中性化速度に及ぼす材料および配合的要因である水セメント比、セメントや骨材の種類、混和材(剤)の種類とその添加量、養生条件および締め固めなどの影響についてはかなりの部分が明らかにされており、これらの要因を含む中性化速度式として岸谷式¹⁾、白山式²⁾、依田式³⁾などが提案されている。

従来の中酸化速度式は、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⁴⁾。

$$X = A\sqrt{t} \dots \dots \dots (1)$$

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。ここに、最も一般的に用いられている岸谷式の一例を示す。

$$X = R(W/C - 0.25) / 0.3(1.15 + 3W/C) \cdot \sqrt{t} \\ (W/C \geq 0.6)$$

$$X = R(4.6W/C - 1.76) / 7.2 \cdot \sqrt{t} (W/C \leq 0.6)$$

ここに、 X : 中性化深さ (cm)

t : X まで中性化する期間 (年)

W/C : 水セメント比

R : セメントの種類、骨材の種類、混和剤 (AE 剤, AE 減水剤) の種類によって決まる定数

この他提案されている白山式、依田式についても岸谷式と同様の形式をとっている。しかし、これらの速度式は自然環境下を対象としており、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ず、炭酸ガス濃度以外の環境因子である温度、湿度の影響についても考慮されていない。例えば、温度が異なる場合温度が高いほど中性化が早く進行するという研究報告もある^{5), 6)}。従って、従来速度式は実験的に求めた係数を用い、水セメント比の関数として表したごく一般的な中性化速度推定式であるといえることができる。

一方、コンクリートの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、従来より炭酸ガス濃度、温度を高めた促進中性化試験が行われている。しかし、これは対象となる構造物と同一の材料、同一の配合での試験が可能にもかかわらず自然環境下における中性化の進行との対応が十分明らかにされていないため、その試験系の中でどの材料が中性化に対しての抵抗性があるかの比較にとどまっている。このため、各研究機関等で行われている促進中性化試験は各機関によって炭酸ガス濃度、温度および湿度等の試験条件がさまざまであり、標準試験法として確立されていないのが現状である。これは、コンクリートの中酸化速度に及ぼす炭酸ガス濃度、温度および湿度等の環境条件に起因する影響が明らかにされていないためであると考えられよう。

本稿では、中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度の影響をプレーンコンクリートを用いて実験的に明らかにすることにより、炭酸ガス濃度の要因を含んだ中性化速度式を

*正会員 工博 東京大学生産技術研究所 教授
(〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

**正会員 藤沢薬品工業 (株) 筑波コンクリート研究所

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				初期養生条件
		W	C	S	G	
70	49	184	263	908	978	0 日 及 5 日
60	47		307	854	996	
50	45		368	795	1005	

提案した。なお、プレーンコンクリートとした理由については、AE 剤や AE 減水剤を用いた空気量 4% 程度のコンクリートは空気量増大による中性化のしやすさとセメントの分散効果による組織の密実さによって、プレーンコンクリートとほぼ同程度の中性化速度であると報告しており、今日では一般的となっているためである⁷⁾。したがって、本研究ではピュアなセメント硬化体を考えプレーンコンクリートとした。そこでこの提案式を用いて各研究機関等におけるさまざまな促進中性化試験条件で行われた試験結果との比較検証を行い、その結果より炭酸ガス濃度以外の温度や水セメント比の影響も含んだ中性化速度式を提案したものである。これらの結果より、各研究機関等で行われた促進中性化と屋内自然環境下における中性化の進行との相関が、ある程度まで説明できることを示したものである。

2. 実験概要

(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; 20 mm, 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 8 cm, 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。

(2) 中性化試験

コンクリート試験体は、直径 10 cm, 高さ 20 cm の円柱供試体で、打設後 48 時間後に脱型しその後、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, 相対湿度 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。中性化深さの測定は、圧縮強度試験を終了した試験体を 10 × 20 cm 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。なお、中性化深さは割裂面の一方向に対して 5 点の計 20 点をノギスを用いて測定し、その平均値とした。

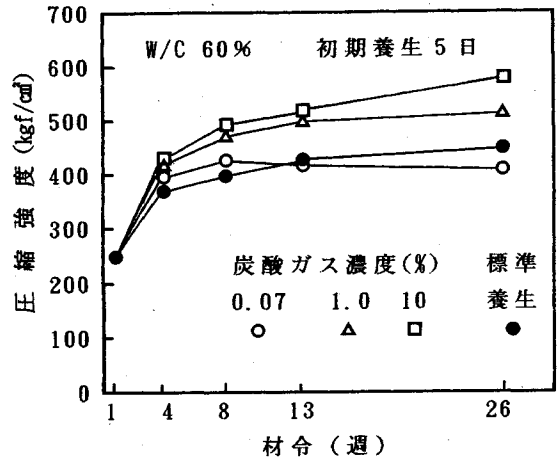


図-1 圧縮強度の経時変化

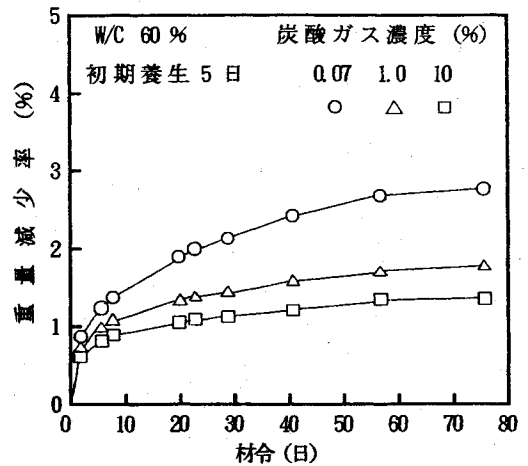


図-2 重量減少の経時変化

3. 実験結果と考察

(1) コンクリートの圧縮強度と重量減少率

図-1 に、炭酸ガス濃度の違いによる圧縮強度試験結果の一例を示す。炭酸ガス濃度が高いほど、材令とともに強度が増大する傾向を示しており、炭酸ガス濃度が 1% および 10% で促進中性化したものは比較対象として試験した標準養生時強度よりも高く、中性化の進行に伴って強度の増大が認められた。また、屋内自然暴露したものは、中性化の進行速度が遅いものの、中性化による強度の増大はみられず、材令 8 週以降ほぼ一定かあるいは若干低下している傾向を示した。

図-2 に同じく炭酸ガス濃度の違いによるコンクリートの重量減少率の結果の一例を示す。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。これは、炭酸化反応によりコン

クリートと反応した分だけ重量増があるが、それ以外に図-1に示したように炭酸ガス濃度が高いほど中性化した部分の圧縮強度が増大しその結果、内部の水分の逸散が抑制されたためであると考えられる⁹⁾。

(2) 中性化深さ

図-3~図-5に、炭酸ガス濃度の違いによる水セメント比別の中性化深さの経時変化の結果を示す。式(1)に示したように、一般に中性化深さは経過時間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、ほぼ経過時間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よって支配されていると思われる。また、同一炭酸ガス濃度でみた場合、水セメント比の増大に伴って中性化速度が増大するのが分かる。これは、従来の中性化速度式が水セメント比の関数によって表されていることから、水セメント比が中性化速度に及ぼす影響は大きいものと考えられる。初期養生の影響については、全く養生を行わないものは、水中5日養生のものに比べ中性化の進行はかなり大きく同一材令における初期養生0日の中性化深さは、初期養生5日の約1.9倍~2.4倍となった。なお、初期養生期間が5日以上であれば養生期間が中性化速度に及ぼす影響はそれほど大きくないことが知られている⁹⁾。これら水セメント比および初期養生期間の影響は、コンクリートの組織の緻密化に関係し、組織が緻密なほど炭酸ガスがコンクリート中に拡散しにくくなり、中性化の進行速度が小さくなると考えられる。

表-2に図-3~図-5に示す直線の傾きを中性化速度係数とし、最小自乗法で求めた各コンクリートにおける中性化速度係数と相関係数の結果を示す。これよりいずれのコンクリートでも相関係数でほぼ0.95以上の高い相関が得られた。また、炭酸ガス濃度の影響についてみると、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、屋内自然暴露したものでは33倍~49倍、1%で促進試験したものでは7倍~11倍となる。

ここで、表-2より屋内自然暴露したものの中性化速度係数を1としたときの各炭酸ガス濃度の中性化速度係数の結果を図-6に示す。水セメント比、初期養生条件の違いにもかかわらずほぼ一定の比率を示している。これはコンクリートの種類にかかわらず炭酸ガス濃度による促進倍率が常に一定であることを意味している。つまり温度、湿度等が一定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。

表-2 各試験条件における中性化速度係数

初期養生期間 (日)	W/C (%)	中性化速度係数		
		炭酸ガス濃度 (%)		
		0.07 (屋内)	1.0	10
0	70	1.78 (0.977)	4.63 (0.995)	11.0 (0.996)
	60	1.23 (0.994)	3.29 (0.997)	7.05 (0.994)
	50	0.67 (0.972)	1.87 (0.978)	4.14 (0.988)
5	70	0.79 (0.988)	2.62 (0.983)	5.51 (0.985)
	60	0.62 (0.924)	1.60 (0.999)	3.61 (0.998)
	50	0.27 (0.824)	0.82 (0.959)	1.72 (0.992)

*中性化速度係数は中性化深さ(mm)、促進期間(週)として計算した値、カッコ内は相関係数を示す。

4. 中性化速度に及ぼす各種要因の影響

(1) 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

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、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^{10), 11)}。

$$dX/dt = k \cdot C/X \dots \dots \dots (2)$$

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。

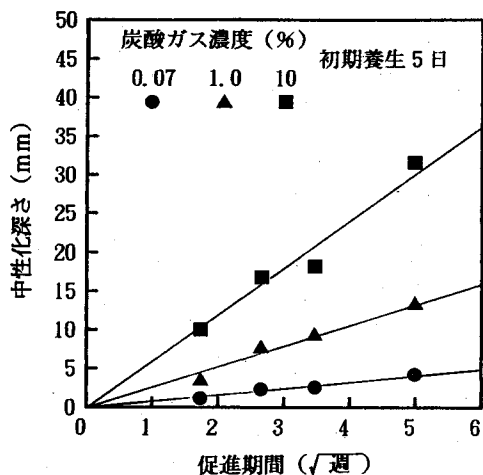
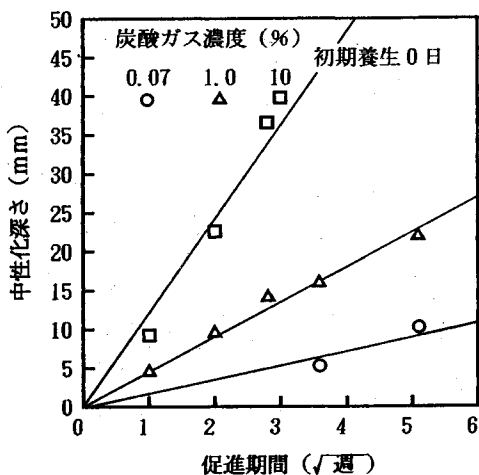
この式(2)を積分して微分方程式を解き、時間0のとき(t=0)、中性化深さが0(X=0)とすると次式で表される。

$$X = k\sqrt{C \cdot t} \dots \dots \dots (3)$$

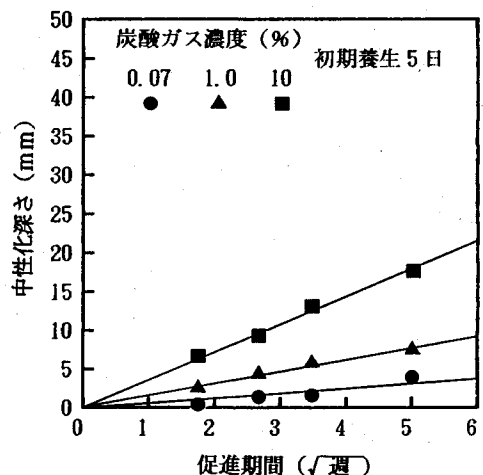
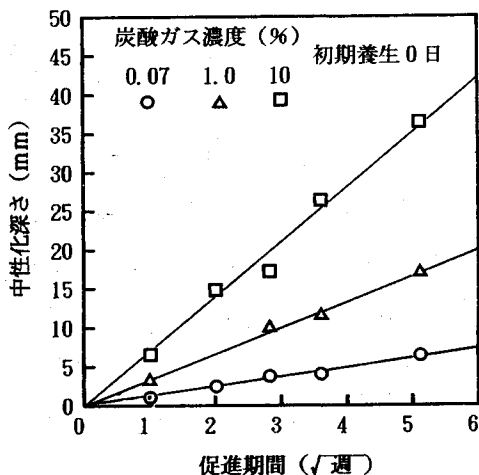
従来の中性化速度式は、先にも述べたように自然環境下での式であり大気中の炭酸ガス濃度は常に一定値であるため、炭酸ガス濃度の項が入っていない。式(3)中のCを定数とした場合、従来の式が得られる。

以上の考えをもとに、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-7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、図-1に示した圧縮強度試験の結果、図-2に示した重量減少率の結果等により、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。

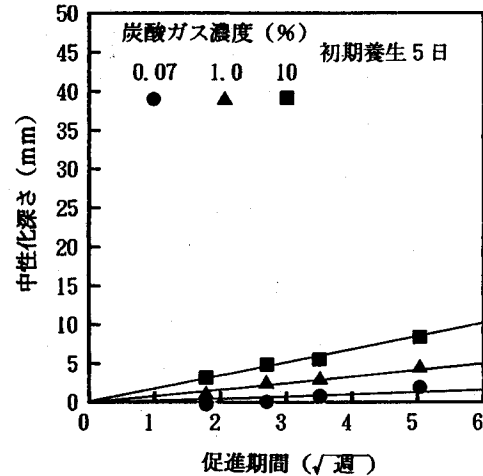
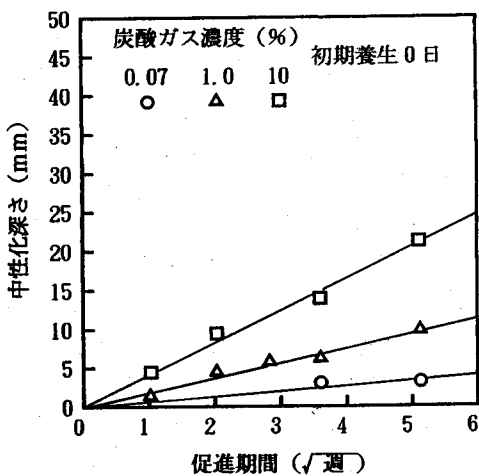
ここで、式(3)におけるkの値は次式に示すように、環境条件に起因する項として、炭酸ガス濃度(k_{CO_2})と温度(k_T)および湿度(k_H)、また、水セメント比など



図—3 中性化深さの経時変化 (水セメント比 70%)



図—4 中性化深さの経時変化 (水セメント比 60%)



図—5 中性化深さの経時変化 (水セメント比 50%)

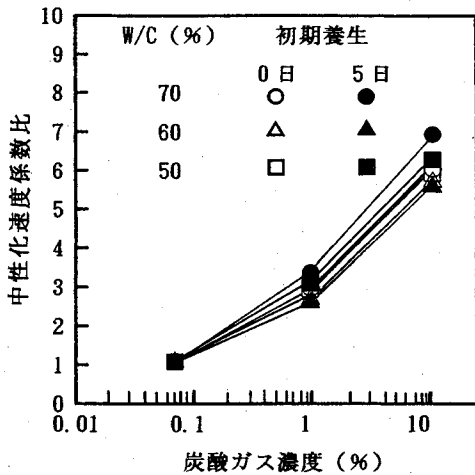


図-6 炭酸ガス濃度と中性化速度係数比との関係

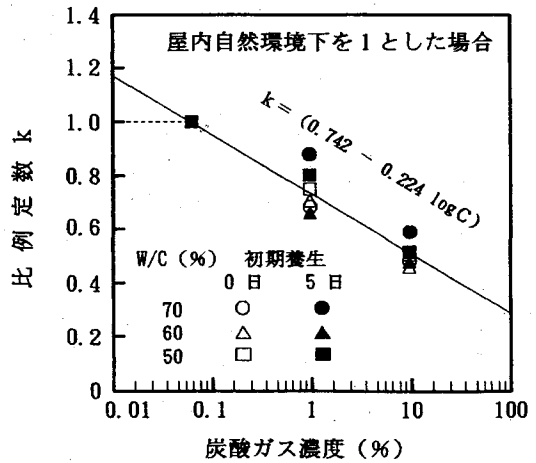


図-7 炭酸ガス濃度と比例定数 k との関係

の材料および配合条件に起因する項として (k_w) によって表せると仮定する。

$$k = k_{CO_2} \cdot k_T \cdot k_H \cdot k_w \dots (4)$$

今、式 (4) にある k_T , k_H および k_w については一定の条件であるため定数となるが、炭酸ガス濃度については 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炭酸ガス濃度 C が 0.07% のとき 1 となるように以下の式 (実験式) で表した。

$$k_{CO_2} = (0.742 - 0.224 \log C) \dots (5)$$

以上のことより、炭酸ガス濃度の要因を加えた中性化速度式は次式となる。

$$X = (0.742 - 0.224 \log C) A \sqrt{(C/0.07) \cdot t} \\ = (2.804 - 0.847 \log C) A \sqrt{C \cdot t} \dots (6)$$

ここに、 X は中性化深さ (mm), C は炭酸ガス濃度 (%), t は経過時間 (週), A は屋内自然環境下 (ここでは $C=0.07\%$) における中性化速度係数を示す。

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 (6) 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進行していたかが明らかとされなかったが、式 (6) 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 (6) 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、屋外自然環境下 (炭酸ガス濃度 0.0351%¹²⁾) 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、湿度の変化や雨など

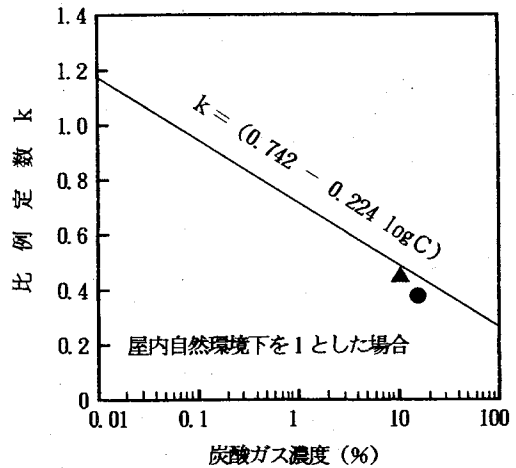


図-8 既往の実験結果との比較

による乾湿の繰り返しを受けるため、中性化の進行がさらに抑制されることが知られている¹³⁾。また、屋外でのこれらの影響は地域特性によって当然異なると考えられる。しかし、少なくとも従来の中性化速度式²⁾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うち、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-8に、同じ材料、同じ試験条件下で、屋内自然環境下と促進試験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^{4), 5)}。

(2) 既往の促進中性化試験より求めた屋内自然環境下における中性化速度の予測

図-9に、各研究機関等 (合計 34 カ所) で行われた普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの促進中性化試験の結果を示す^{4)-9), 13)-40)}。横軸に水セメン

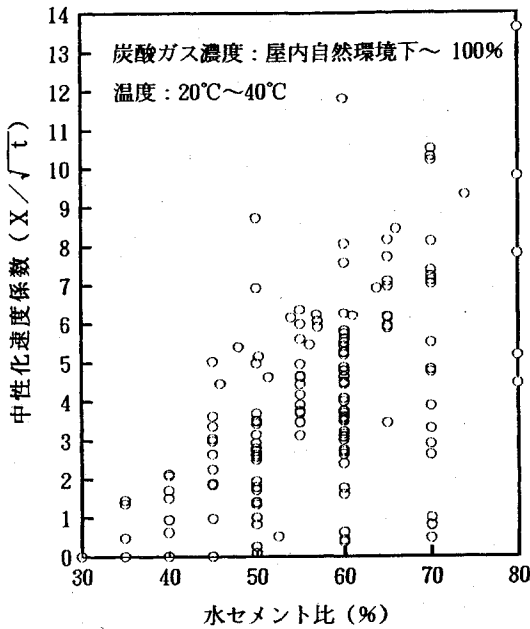


図-9 各研究機関における促進中性化試験結果

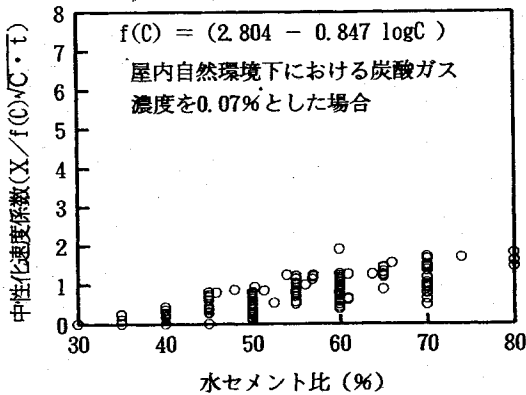


図-10 促進中性化試験結果より求めた屋内自然環境下における中性化速度係数の予測値

ト比、縦軸に中性化深さを経過時間の平方根で割った中性化速度係数を示す。中性化試験条件は、表-3に示すように炭酸ガス濃度が屋内自然環境下（炭酸ガス濃度で0.1%前後）から100%までのものがプロットされている。温度については10℃から40℃の範囲のもの、相対湿度については最も中性化の進行の速いとされている40%RHから60%RHの範囲のものである。なお、いずれの研究でも炭酸ガス濃度、温度および相対湿度はすべて一定の条件で試験されたものである。

ここで、先に提案した炭酸ガス濃度を含んだ中性化速度式（式（6））より、図-9に示す全ての実験データについて、屋内自然環境下の炭酸ガス濃度（ここでは、0.07%）に換算した値、つまり屋内自然環境下における

表-3 中性化試験条件

環境条件による因子	炭酸ガス濃度	屋内自然環境下～100%までの一定濃度
	温度	10℃～40℃までの一定温度
	相対湿度	40%RH～60%RHまでの一定湿度
初期養生期間による因子	初期養生期間(20℃水中)	5日(材令7日)～91日
	中性化試験開始までの乾燥期間	初期養生後、直ちに中性化試験を開始するもの～28日
材料による因子	セメント	普通ポルトランドセメント
	骨材	川砂、川砂利(砕石)
	水セメント比	30%～80%
	混和剤	ブレーン、AE剤、AE減水剤および高性能減水剤

中性化速度の予測値を図-10に示す。図に示すように、炭酸ガス濃度の要因を取り除くことにより、ほぼ同じ範囲内にプロットされているのがわかる。ただし、ここにプロットされている中性化速度係数は、それぞれの中性化試験における温度、湿度環境下の中性化速度の予測値であるため、中性化速度に及ぼす温度、湿度および初期養生条件等の違いによる影響も含まれている。また、当然のことながら、本来その材料がもっている材料、配合に起因する影響も含まれている。

(3) 中性化速度に及ぼす温度の影響

図-10における中性化速度に及ぼす温度の影響を詳細に調べるために、温度別にプロットしたものを図-11に示す。図より、若干のバラツキはあるものの温度が高いほど中性化速度係数が大きい傾向を示している。既往の研究では、炭酸ガス濃度10%、相対湿度80%の一定環境下で実験を行った結果、温度40℃の条件での中性化速度係数が温度20℃の場合の2倍の促進倍率であると報告されている⁵⁾。また、別の研究によれば、炭酸ガス濃度5%、相対湿度60%の一定環境下での結果では、温度30℃の条件のものは10℃の約1.7倍の促進倍率であるとしている⁶⁾。

中性化の進行は、大気中の炭酸ガスとコンクリート中の水和生成物である水酸化カルシウムとの反応によって進行するため、化学反応を伴って進行していく。化学反応の反応速度に及ぼす温度の影響は、ある温度で爆発的に反応が進行するものや、ある種の酵素触媒反応に見られるある特定の温度で一番反応が速く進行するもの以外

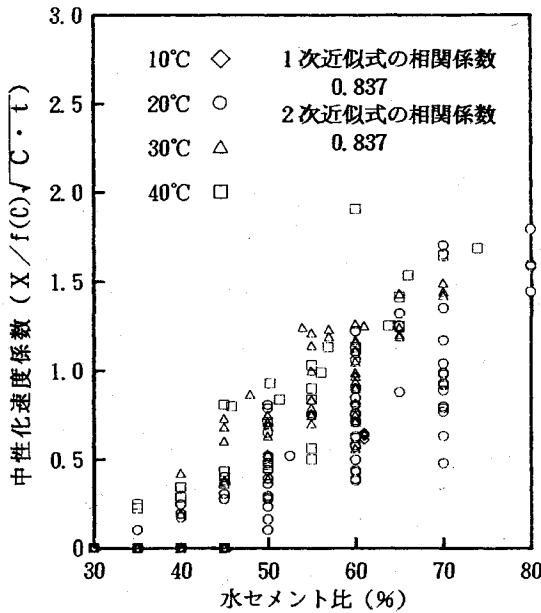


図-11 温度別における屋内自然環境下における中性化速度係数の予測値

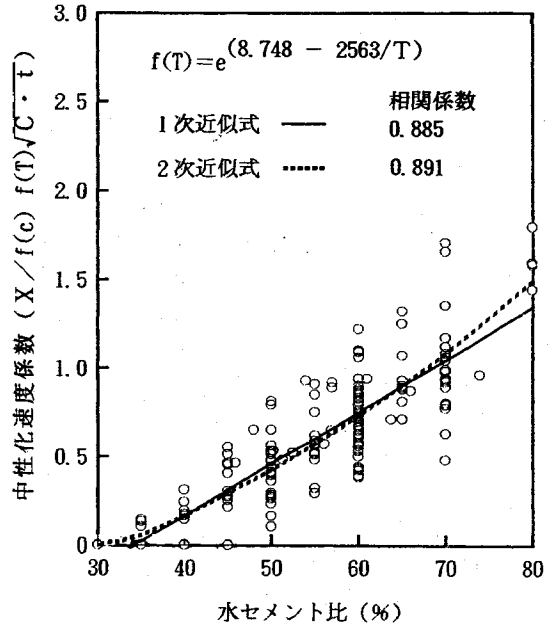


図-13 炭酸ガス濃度と温度を考慮した屋内自然環境下における中性化速度の予測値

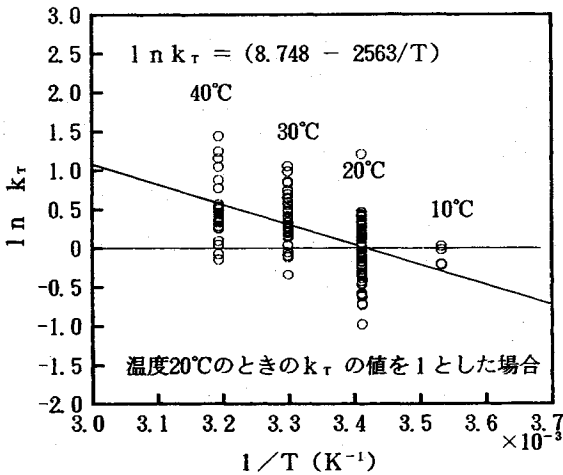


図-12 図-11 に対する Arrhenius のプロット

は、温度が高くなるほど指数関数的に反応が進行するという Arrhenius の理論に従うとされている。そこで、図-11 に示すデータについて、20°C における中性化速度係数を 1 とした場合の Arrhenius プロットの結果を図-12 に示す。横軸に絶対温度の逆数、縦軸に中性化速度係数の対数を取った場合、直線関係が得られれば Arrhenius 則に従うとされている。図に示すようにデータによってかなりのバラツキはあるものの、Arrhenius 則に従うと仮定した場合、中性化速度に及ぼす温度の影響は以下の通りとなる。

$$\ln k_r = (8.748 - 2563/T)$$

$$k_r = e^{(8.748 - 2563/T)} \dots \dots \dots (7)$$

(ただし、式(7)は20°Cを基準とした式であり温度が20°Cのとき k_r が1となる式である。Tは絶対温度(K))

式(7)より、温度30°Cおよび40°Cの条件における中性化速度係数は、温度20°Cの場合のそれぞれ1.33倍、1.75倍となる。これは、先に述べた既往の実験結果とほぼ一致しているのがわかる。また、これより Arrhenius 理論による活性化エネルギーは $2.13 \times 10^4 \text{ J mol}^{-1}$ となる⁴⁾。

そこで、式(7)を用いて図-11の温度の影響をすべて20°Cに換算した屋内自然環境下における中性化速度係数の結果を図-13に示す。温度の影響を取り除くことにより図-11にプロットされている範囲より更に狭くなっているのがわかる。なお、ここにプロットされている中性化速度係数は、炭酸ガス濃度(0.07%)、温度(20°C)が一定環境下の中性化速度の予測値であり、湿度の影響がまだ含まれている。しかし、湿度の試験条件が40% RH~60% RHの最も中性化の進行が速いとされている条件下だけの試験結果であるため湿度の影響はあまり含まれていないと考えられる。つまり、図-13に示されている傾きは主に中性化速度に及ぼす水セメント比の影響であると考えられる。

(4) 中性化速度に及ぼす水セメント比の影響

水セメント比の中性化速度に及ぼす影響は、今まで数多くの研究が行われているが、ここでは従来より提案されている中性化速度式である岸谷式、白山式および依田式にある水セメント比の影響と図-13より水セメント

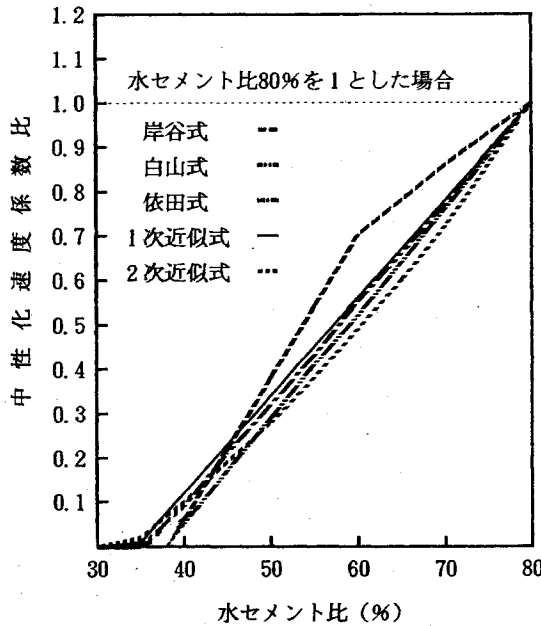


図-14 中性化速度におよぼす水セメント比の影響

比の影響を求めた1次近似式および2次近似式とを比較した結果を図-14に示す。従来の中性化速度式は屋外環境下での式であるため、中性化速度係数の絶対値での比較ができないため、水セメント比80%を1とした場合を比較した。図に示すように、1次近似式、2次近似式の両者とも提案されている水セメント比の中性化速度に及ぼす影響とよく一致しているのがわかる。このことは、言い換えれば先に示した炭酸ガス濃度の要因を含んだ式(6)あるいは温度の影響を示した式(7)の妥当性を示唆しているものといえよう。

以上のことより、中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度、温度および水セメント比の影響を含んだ中性化速度式は以下の通りとなる。なお、下記の式では炭酸ガス濃度が屋内自然環境下~100%、温度については10°C~40°C、水セメント比については30%~80%までの範囲とする。

・水セメント比の1次近似式

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \cdot e^{(8.748 - 2.563/T)} \times (2.94WC - 101.2) \times 10^{-2} \times \sqrt{C \cdot t} \dots (8)$$

・水セメント比の2次近似式

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \cdot e^{(8.748 - 2.563/T)} \times (2.39WC^2 + 44.6WC - 3980) \times 10^{-4} \times \sqrt{C \cdot t} \dots (9)$$

ここに、 X は中性化深さ(mm)、 C は炭酸ガス濃度(%), T は絶対温度(K), WC は水セメント比(%) t は経過時間(週)を示す。

(5) 促進中性化試験における実験値と計算値の比較

図-15に各研究機関における促進中性化試験結果よ

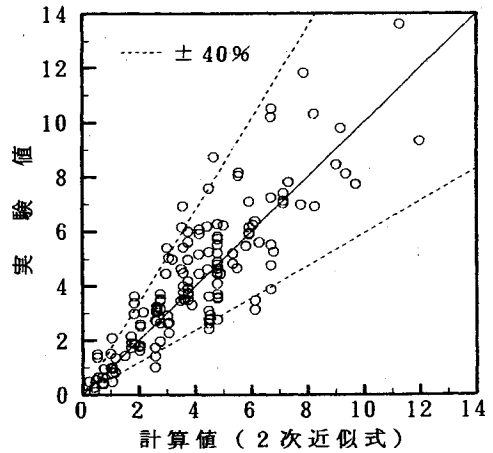


図-15 中性化速度係数の実験値と計算値の比較

り求めた中性化速度係数の実験値と式(9)より求めた中性化速度係数の計算値との比較を示す。従来より提案されている式では、中性化の促進因子である炭酸ガス濃度や温度等が考慮されていないために図-9にも示したように中性化速度係数に大きなバラツキがあるが、提案式を用いることにより実験値と計算値とのバラツキが±40%の範囲に入っているのがわかる。この±40%のバラツキは、その他の因子である湿度、養生条件の違いおよびセメントや骨材等の材料の種類の違いによる影響が含まれているためと考えられる。しかしながら、従来では炭酸ガス濃度および温度の中性化速度に及ぼす影響が明らかとされなかったが、式(8)または式(9)を用いることにより促進中性化と屋内自然環境下における中性化の進行との相関がある程度まで説明できると考えられる。

5. ま と め

本研究は、異なる炭酸ガス濃度環境下において中性化試験を行い、炭酸ガス濃度が中性化速度に及ぼす影響について明らかにし、既往の促進中性化試験結果と比較検証したものである。本研究で得られた成果を要約すると以下のとおりとなる。

(1) 異なる炭酸ガス濃度環境下において中性化試験を行った結果、式(6)に示したように炭酸ガス濃度が中性化速度に及ぼす影響を炭酸ガス濃度の項を含む中性化速度式として表すことにより、炭酸ガス濃度による中性化の促進倍率が明らかとなった。

(2) 各研究機関等で行われた促進中性化試験結果より、式(6)に示す炭酸ガス濃度の要因を取り除いた結果、中性化速度に及ぼす温度の影響を Arrhenius 則を用いることによって示すことができた。

(3) 中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度および温度の影響を明らかにすることによって、その他の中性化速度

に及ぼす影響を水セメント比の関数として表した。

(4) 本稿で提案した炭酸ガス濃度を含む中性化速度式を用いて、各研究機関等で行われた促進中性化試験結果とを比較検証することにより、炭酸ガス濃度以外の温度および水セメント比の要因を含めた式(8)または式(9)で示される中性化速度式を提案した。

最後に、本研究の一部は平成2, 3年度文部省科学研究補助金(試験研究B, 研究代表者; 魚本健人)によったことをここに付記する。

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, No. 429, 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, No. 272, 1969.
- 5) 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.
- 6) 柳・友沢ほか: コンクリートの中性化進行予測に関する実験(その2), 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1124, 1987.
- 7) たとえば和泉・押田ほか: コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調査および養生条件の影響について, コンクリート工学年次講演会論文集, No. 30, 1985.
- 8) 高田・魚本: 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, コンクリート工学年次論文報告集, No. 1115, 1991.
- 9) たとえば田中・友沢ほか: コンクリートの中性化進行予測に関する実験, (その1) 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1123, 1987.
- 10) 久保・水渡ほか: 粉体「理論と応用」, 丸善, 1974.
- 11) 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.
- 12) 化学工学, 「特集: CO₂問題と化学工学の役割」 54 (1) 6, 1990.
- 13) たとえば和泉意登志ほか: 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.
- 14) 飛坂・笠井ほか: 高性能減水剤によるコンクリートの耐久性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, No. 1111, 1990.
- 15) 大岸・楊ほか: コンクリートの炭酸化促進試験結果と自然炭酸化との対応関係, セメント技術年報, No. 92, 1991.
- 16) 宇野・小林: コンクリートの炭酸化に影響を及ぼす要因, 土木学会年次学術講演集, V-294, 1989.
- 17) 棚野・栢田: コンクリートの中性化進行モデル, コンクリート工学論文集, Vol. 2, No. 1, 1991.
- 18) 牛島・西村ほか: 金属容射皮膜による腐食因子の遮断効果に関する考察, 土木学会年次学術講演集, V-230, 1990.
- 19) 三浦・十河ほか: 超微細な高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの細孔分布と耐久性, 土木学会年次学術講演集, V-78, 1990.
- 20) 飛坂: 高性能減水剤を使用した低水セメント比コンクリートの中性化, コンクリート工学年次講演会論文集, No. 49, 1984.
- 21) 笠井・松井ほか: コンクリートの中性化と透気性, コンクリート工学年次講演会論文集, No. 48, 1984.
- 22) 尾崎: コンクリートの諸特性に及ぼす炭酸化の影響に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, No. 50, 1984.
- 23) 笠井・長野: 透水型枠及び合板型枠を用いたコンクリートの品質判定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, No. 1078, 1988.
- 24) 横田・竹下: 施工方法とコンクリートの品質について, コンクリート工学年次論文報告集, No. 1068, 1989.
- 25) 中村・鯉淵: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, No. 1089, 1989.
- 26) 和泉・押田: 炭酸ガスがコンクリートの中性化速度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, No. 1098, 1990.
- 27) 平井・成田ほか: 流動化コンクリートに関する中性化試験の一例, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1125, 1987.
- 28) 押田・和泉: コンクリートの中性化深さのばらつきについて, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1126, 1987.
- 29) 依田・枝広ほか: CO₂促進した中性化コンクリートの性質, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1059, 1985.
- 30) 田代・四戸ほか: 促進養生を行ったコンクリートの性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1101, 1986.
- 31) 浦野・佐々田ほか: 高耐久性コンクリートの開発研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1107, 1986.
- 32) 平井・三橋ほか: 中性化に及ぼす湿度環境と水セメント比の影響, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1201, 1988.
- 33) 佐伯・長龍ほか: 降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化, コンクリート工学年次論文報告集, No. 1103, 1991.
- 34) 大賀・長瀧: 促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価, 土木学会論文集, V-8, 1988.
- 35) H. Ohga and S. Nagataki : Prediction of Carbonation Depth of Concrete with Fly Ash, ACI SP-114, 1989.
- 36) 杉田・御手洗: 各種セメントを用いたコンクリートの中性化に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1203, 1988.
- 37) 牛島・酒井ほか: 防食効果に及ぼすコンクリートの表面状態に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, No. 1110, 1991.
- 38) 原・西川: コンクリート用塗料による中性化抑制効果の耐久性に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1081, 1990.
- 39) 柳・友沢ほか: コンクリートの中性化進行予測に関する実験(その3), 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1202, 1988.

40) 柳・友沢ほか：コンクリートの中性化進行予測に関する
実験（その4），日本建築学会大会学術講演概要集，
No.1306, 1989.

41) 藤代亮一訳：パーロー物理化学（下），東京化学同人，
1978.

（1991.8.2. 受付）

FACTORS AFFECTING CONCRETE CARBONATION RATIO

Taketo UOMOTO and Yoshiaki TAKADA

Research work was devoted to the study of carbonation as one of the major causes of concrete deterioration. Big amount of field data and accelerated carbonation, in laboratory control tests, was collected. This led to many formulas describing the carbonation rate. However, most of them contain water/cement ratio and time as the only parameters affecting carbonation. Intuitively, carbonation should be affected, also, by CO₂ concentration and environmental conditions. Hence, in this research, the effect of CO₂ concentration on carbonation rate of concrete is clarified through experiments. This, besides a comparative study on the data available in the literature led to the introduction of new equation for the carbonation rate. This equation considers, as its parameters, the concentration of CO₂ and temperature in addition to water/cement ratio. The equation is employed in correlating accelerated and natural carbonation and shows good performance.