

## 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

PREDICTION AND EVALUATION OF THE DEPTH OF CARBONATION  
OF CONCRETE BY ACCELERATED TEST

大賀 宏行\*・長瀧 重義\*\*

By Hiroyuki OHGA and Shigeyoshi NAGATAKI

The effect of initial curing periods in water, the replacement ratio of fly ash and binder content on the depth of carbonation of concrete under accelerated carbonation condition is evaluated to predict the depth of carbonation of concrete under natural exposure condition. The depth of carbonation depends on these factors and it can be predicted by the effective water-binder ratio or compressive strength of concrete cured in water for 28 days. The test results of the accelerated carbonation test are compared with those of the natural exposure test. The depth of carbonation of concrete exposed indoors for 15 years has a good correlation with the calculated values by the equations proposed in this study. The depth of carbonation of concrete under natural indoor condition can be predicted by the accelerated carbonation test.

*Keywords: carbonation, prediction, accelerated test, fly ash, pore structure*

## 1. ま え が き

近年、塩害に関する問題に関心が集まり、数多くの研究が行われている。海砂の使用などによる初期の段階からの塩分の存在や外部からの塩分の浸透により、コンクリートに埋め込まれた鉄筋の腐食は促進されるが、これらの塩分が存在しない場合には、コンクリート中のアルカリ分のために、鉄筋は不動態の状態となり、発錆の危険性は少ないとされている。しかし、大気中に存在する二酸化炭素は、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応し、コンクリート中のアルカリ性を低下させるため、中性化深さが鉄筋の位置まで到達すると、鉄筋が腐食する可能性が生じる。このため、中性化深さを予測することはコンクリート構造物の耐久性を考えるうえで重要なことである。

大気中の二酸化炭素はわずかであるため、自然暴露により中性化深さを測定することは試験に長期を要することから、二酸化炭素濃度を高めた促進試験装置を用い実験的に中性化深さを求め、長期材令時の中性化深さを予

測する方法、コンクリートの中性化が二酸化炭素の拡散により生じることから拡散方程式を用い中性化深さを予測する方法等が行われている。しかし、これらの場合、実際の構造物の中性化深さととの相関について検討を加える必要がある。また、コンクリートの中性化は水セメント比、単位セメント量、フライアッシュの置換率等の配合条件だけでなく、初期の養生条件、温度、湿度および二酸化炭素濃度等の環境条件によっても影響を受けることが明らかとなっている<sup>1)~6)</sup>。

そこで本研究は長期材令のコンクリートの中性化深さを予測するため、二酸化炭素濃度を高めた促進中性化試験装置を用い、コンクリートの中性化試験を行い、初期の水中養生材令、単位結合材量やフライアッシュの置換率等の配合条件の影響について検討を加えるとともに、15年間自然暴露したコンクリートの中性化深さとと比較検討し、促進試験による中性化深さの予測について検討を加えた。

## 2. 実験概要

## (1) 使用材料

普通ポルトランドセメント(3社等量混合)およびフライアッシュを用いた。細骨材は川砂を、粗骨材は砕石を用いた。混和剤はAE減水剤および空気量調整のた

\* 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科  
(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

\*\* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科  
(同上)

めの AE 補助剤を用いた。

(2) 配合

単位結合材量を 250, 290, 330, 370 kg/m<sup>3</sup>, フライアッシュの置換率を 0 % および 30 % とし, 混和剤を一切用いずスランブが 80 mm となるように単位水量を決定したシリーズ (non AE コンクリート) と, AE 減水剤を用い, スランブが 80 mm, 空気量が 4.0 % となるように単位水量および AE 補助剤量を決定したシリーズ (AE コンクリート) を用いた。コンクリートの配合を表一に示す。

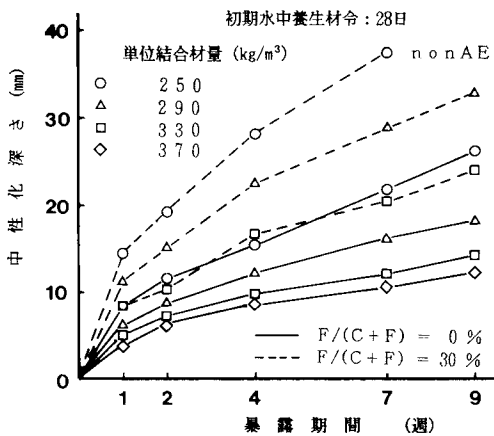
表一 コンクリートの配合

シリーズ	C + F (kg/m <sup>3</sup> )	F/(C+F) (%)	W/(C+F) (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	スランブ (mm)	空気量 (%)
nonAE	250	0	74.0	185	72	1.5
		30	71.2	178	88	0.9
	290	0	63.8	185	82	1.3
		30	61.0	177	82	1.0
	330	0	56.1	185	80	1.3
		30	53.6	177	88	1.2
370	0	51.4	190	75	1.8	
AE	250	0	66.0	165	90	3.8
		30	63.6	159	100	4.0
	290	0	56.9	165	70	3.2
		30	54.8	159	90	4.7
	330	0	50.3	166	75	3.7
		30	47.9	158	86	4.5
370	0	45.9	170	70	3.3	

(3) 養生条件

供試体は打設後 20°C の水中で 7, 28, 91 日間養生後, 促進中性化試験装置へ移動した。促進中性化試験装置は, 温度 40°C, 湿度 50 % RH, 二酸化炭素濃度 7 % に調整した。

コンクリートの圧縮強度試験は水中養生材令 7, 28, 91 日において行い, 中性化試験は装置へ搬入後 1, 2, 4, 7, 9 週後 (一部, 3 週および 5 週も追加) において行った。



図一 中性化深さの経時変化 (non AE コンクリート)

(4) 試験方法

100×100×300 mm の角柱供試体を用いた。コンクリートの中性化深さを測定する断面は, 軸方向に垂直に割裂した断面とした。指示薬は, フェノールフタレイン 1 % アルコール溶液を用い, コンクリートの着色状態から中性化面積を求め, 次式により, 平均中性化深さ  $x_c$  を算出した。

$$x_c = (\sqrt{A} - \sqrt{a}) / 2$$

ただし,  $x_c$  は平均中性化深さ (mm),  $A$  は供試体の断面積 (mm<sup>2</sup>),  $a$  は着色部分の面積 (mm<sup>2</sup>) を示す。

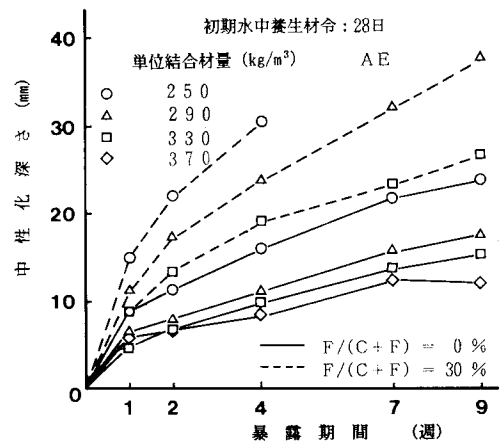
3. 結果と考察

(1) 中性化深さの経時変化

図一および図二にコンクリートの中性化深さの経時変化の一例を示す。中性化深さはフライアッシュ置換の有無, 単位結合材量により異なった値を示している<sup>7)</sup>。コンクリートの中性化は, 二酸化炭素の拡散によって生じることから, 中性化深さは暴露期間の平方根に比例すると考えられる。そこで, 中性化深さと暴露期間の平方根との関係について検討を加えたが, 図三および図四に示すように両者は配合条件によらず高い相関を示しており, 促進中性化試験の場合にも中性化深さは二酸化炭素の拡散に支配されているものと考えられる。この傾向は他の初期水中養生材令の場合にも認められた。そこで, 中性化深さの材令の平方根に対する割合を中性化係数 [ $b : x_c = b\sqrt{t}$ , ただし  $t$  は材令] と定義し, 以下中性化係数を用いて検討を加える。

(2) 初期水中養生材令の影響

図五および図六は初期水中養生材令とコンクリートの中性化係数との関係を示す。non AE コンクリートの場合, 水中養生材令が 7 日の供試体の中性化係数は, 他の水中養生材令の場合に比べ若干大きくなる傾向を示す。



図二 中性化深さの経時変化 (AE コンクリート)

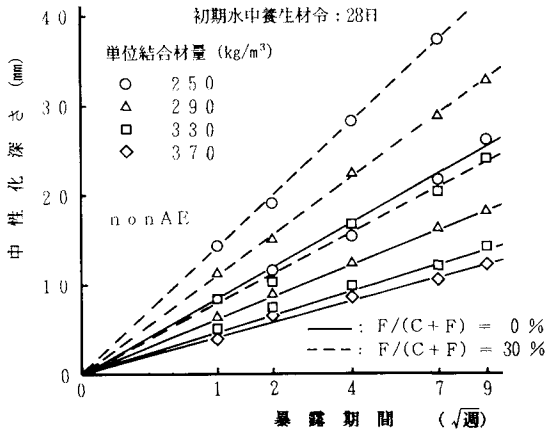


図-3 中性化深さの経時変化 (non AE コンクリート)

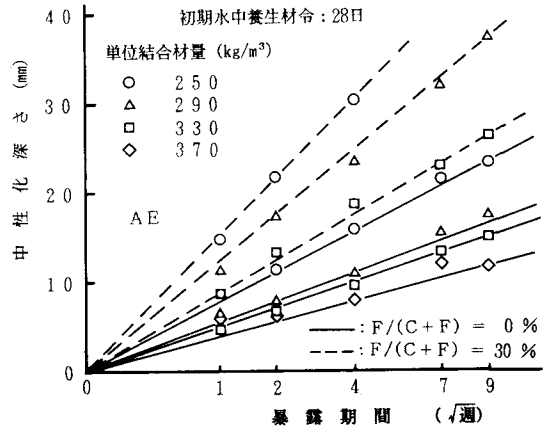


図-4 中性化深さの経時変化 (AE コンクリート)

し、初期水中養生材令が28日以降では中性化係数はほぼ同一であることから、中性化係数に関しては初期に28日間程度水中養生を行えば、初期の水中養生材令の影響はほとんどないと考えられる。

それに対し、AE コンクリートでセメントの30%をフライアッシュで置換し、初期水中養生材令が28日のコンクリートの中性化係数は91日の場合に比べ若干大きく、その差は単位結合材量の減少とともに大きくなっている。

(3) 中性化に及ぼす単位結合材量の影響

コンクリートの中性化係数に及ぼす単位結合材量の影響を図-7に示す。中性化係数は空気量、水中養生材令、フライアッシュの置換の有無によらず、単位結合材量の増加とともに減少している。これは、単位結合材量の増加とともに水結合材比が低減し、コンクリートの組織が緻密になったため、中性化係数も減少したものと考えられる。また、単位結合材量の増加とともに初期水中養生材令の影響は少なくなっている。

(4) フライアッシュ置換の影響

以上の検討より、コンクリートの中性化深さは初期水中養生材令のような外的要因によって大きく影響を受けることが明らかとなったが、コンクリートの品質に影響を及ぼすフライアッシュ置換の有無や水結合材比によっても影響を受けるものと考えられる。

図-8はコンクリートの中性化係数とフライアッシュの置換率の関係を示す。フライアッシュをセメントの30%置き換えることにより、水結合材比は低減するものの中性化係数は増大することが認められた。しかし、単位結合材量を増加することにより、フライアッシュを用いたことによる影響は少なくなり、特にAEコンクリートでフライアッシュを用いた場合、初期水中養生材令の影響も少なくなることが明らかとなった。

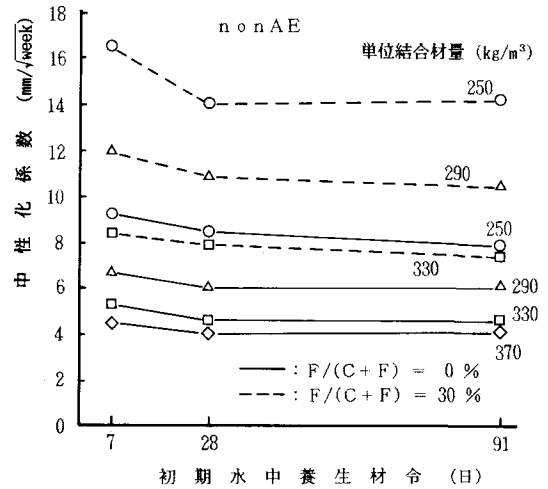


図-5 初期水中養生材令の影響 (non AE コンクリート)

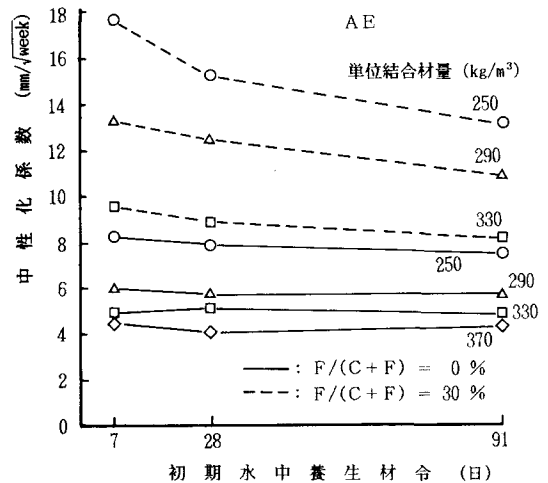


図-6 初期水中養生材令の影響 (AE コンクリート)

フライアッシュを混和することは、セメント量が減少することおよび水和によって生じる水酸化カルシウムがポゾラン反応によって減少する可能性がある。しかし、一方では水結合材比の低減効果もあるので、コンクリートの組織に関連する水結合材比および圧縮強度等についても検討を加える必要がある。図-9はコンクリートの有効水結合材比  $[W/(C+kF)]$  と中性化係数との関係を示す。なお、 $k$ はフライアッシュの結合材としてのセメントに対する貢献度を表わす。すなわち、中性化係数に対し、フライアッシュが結合材としてセメントと同等とみなされる場合が  $k=1$  となり、結合材としての役割がない場合が  $k=0$  となる。non AE コンクリートの場合、自然暴露試験の場合と同様に<sup>6)</sup>フライアッシュの混和の有無により両者の関係は異なり、 $k=0$  の場合の水結合材比（水セメント比）が同一の場合で比べると、フライアッシュを混和したコンクリートの方が小さな中性化係数を示している。すなわち、中性化係数に対し、フライアッシュは結合材として貢献しているものと考えられる。そこで、 $k=0.2$  の場合、中性化係数と有効水結合材比との相関が高いことから、中性化係数に対してはフライアッシュが20% ( $k=0.2$ ) 程度貢献していると考えられる。しかし、AE コンクリートの場合には、non AE コンクリートの場合とは異なり、フライアッシュ混和の有無によらず中性化係数と  $k=0$  の有効水結合材比（水セメント比）はほとんど直線関係にありフライアッシュ混和の影響はほとんどないことが認められる。

(5) 中性化係数と圧縮強度の関係

図-10 および図-11の太線は材令28日の圧縮強度の平方根と7、28および91日間水中養生を行った後、促進中性化試験を行った供試体の中性化係数の関係を示す。圧縮強度と中性化係数はフライアッシュの有無によらず、ほぼ1つの直線で表わされるが、空気量や初期水中養生材令により、その直線はそれぞれ異なっている。non AE コンクリートの場合(2)で述べたように、初期の水中養生材令が7日の場合、他に比べ若干中性化係数は増大するが、28日以上では初期水中養生材令によらずほぼ1本の直線で表わすことができる。しかし、AE コンクリートの場合初期水中養生材令が28日と91日では圧縮強度と中性化係数との関係は異なり、特に圧縮強度が小さい場合には初期水中養生条件の影響は顕著である。また、図中の細線は中性化試験を開始した材令時の圧縮強度の平方根と中性化係数との関係を示すが、材令7日および91日とも、28日の場合と同様に両者はよい相関を示している。同一圧縮強度で比較した場合、水中養生材令が短いほど水結合材比が低いことから、中性化係数も水中養生材令が短いほうが小さな値を示して

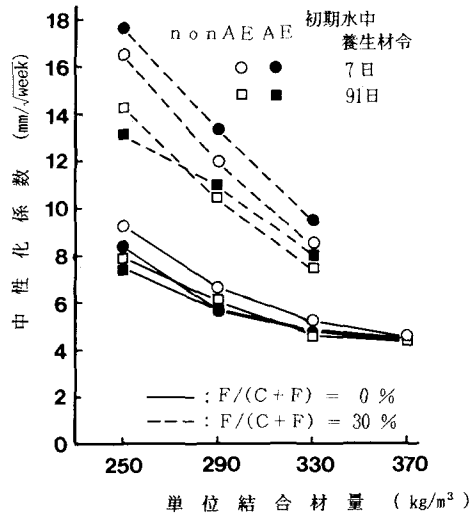


図-7 単位結合材量の影響

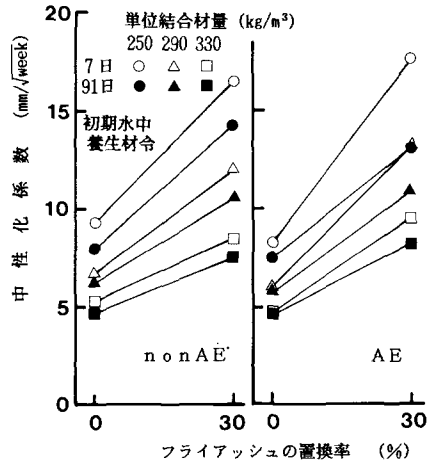


図-8 フライアッシュの置換率と中性化係数

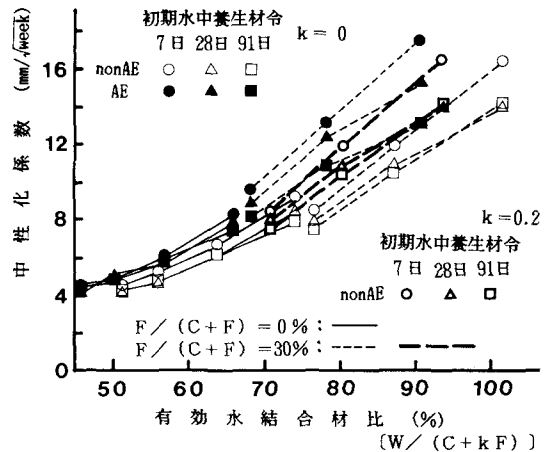


図-9 有効水結合材比と中性化係数

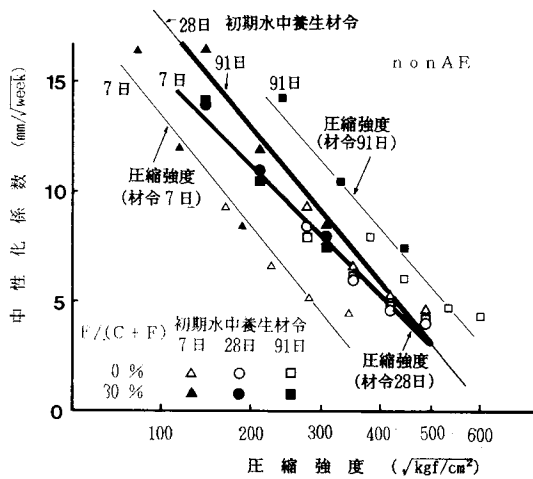


図-10 圧縮強度と中性化係数 (non AE コンクリート)

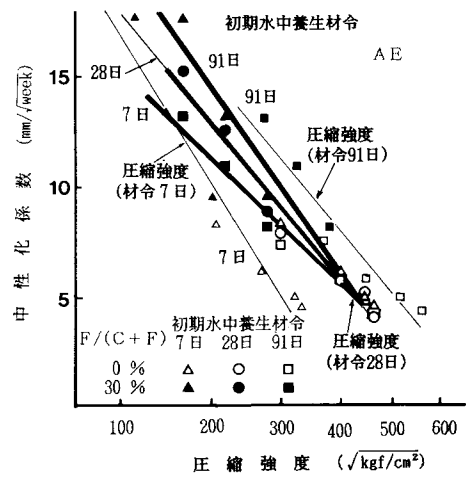


図-11 圧縮強度と中性化係数 (AE コンクリート)

いる。このように、コンクリートの品質が中性化に及ぼす影響も養生条件により異なるものと考えられるが、同一養生条件であれば材令28日圧縮強度により中性化深さを推定することができる。

(6) 中性化深さの予測

以上の検討により、コンクリートの中性化は配合条件、養生条件、環境条件等に影響を受けることが明らかとなったが、コンクリート構造物の耐久性を考えた場合、中性化深さを予測することは設計上重要である。そこで、実験結果をもとに配合条件や圧縮強度を用いてコンクリートの中性化深さの予測を試みる。

コンクリートの中性化深さの予測式は数多く提案されており、屋内に暴露された供試体および屋外でも雨の影響を受けない供試体の中性化深さは、暴露期間の平方根に比例することが明らかとなっている<sup>4),8)</sup>。しかし、雨の作用を受ける供試体の中性化深さは、屋内養生に比べ抑制されるものの<sup>9)</sup>、まだその機構に関しては明らかとなっていない。また、中性化深さの材令の平方根に対する比率(中性化係数)に関しても、水セメント比や圧縮強度等のパラメータを用いた予測式が数多く提案されている<sup>10)~12)</sup>。しかし、フライアッシュを混和した場合には、その減水効果により水セメント比を低減することが可能であるが、フライアッシュの反応性が低いため初期強度が低下するので、フライアッシュ無混和のコンクリートおよびフライアッシュを混和したコンクリートの中性化深さを、水セメント比を用いて1つの式で予測することは困難であると考えられる。

(1) から (5) における検討により、中性化係数は有効水結合材比 ( $W/(C+kF)$ ) および圧縮強度に影響を受けることが明らかとなった。そこで、中性化深さが暴露期間の平方根に比例すること、および中性化係数が

有効水結合材比または圧縮強度の平方根に比例することから、以下に示す中性化深さ推定式を提案し、最小2乗法によりおのおの係数を決定した。

$$x_c = \alpha [W/(C+kF) - \beta] \sqrt{t} \dots\dots\dots (1)$$

$$x_c = \lambda [\mu - \sqrt{f}] \sqrt{t} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $x_c$  は中性化深さ (mm)、 $t$  は材令 (週)、 $W/(C+kF)$  は有効水結合材比 (%),  $f$  は水中養生材令28日の圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>) を示す。

図-5 および図-6 で示したように、初期水中養生材令により中性化係数が異なることを考慮すると、式(1) および式(2) における諸係数は表-2 のようになる。ただし、式(1) において  $k$  は図-9 に示したように、non AE コンクリートの場合 0.2, AE コンクリートの場合 0 とした。

一方、コンクリートの拡散係数  $D$  は、経験的に次式のように表わすことができる<sup>13)</sup>。

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \dots\dots\dots (3)$$

$D_0$ ,  $Q$  は組織に依存し温度に独立な定数,  $R$  が気体定数,  $T$  が絶対温度を示す。さらに、 $x_c = b\sqrt{t}$  とおくと、 $b^2 = \alpha D \dots\dots\dots (4)$

( $\alpha$  は定数) となることから<sup>14)</sup>、式(4) は

$$b^2 = D_0 \alpha \exp(-Q/RT) \dots\dots\dots (5)$$

と表わせる。ここで、コンクリートの組織を代表するパラメータとして圧縮強度  $f$  を用いて、式(5) を次式のように仮定する。

$$b = \exp(\eta(1-\theta f)) \dots\dots\dots (6)$$

したがって、中性化深さは式(7) のようになる。

$$x_c = \exp(\eta(1-\theta f)) \sqrt{t} \dots\dots\dots (7)$$

実験値を用い最小2乗法により係数  $\eta$ ,  $\theta$  を求めると、表-2 のようになる。ただし、表-2 に示した諸係数は温度 40°C, 湿度 50 % R.H., 二酸化炭素濃度 7 % の促

表一2 中性化深さ予測式の諸係数 (促進中性化試験)

初期水中養生材令	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	$\mu$	$\eta$	$\theta$
nonAE	7日	0.284	37.3	1.18	3.30	0.00116
	28日	0.244		1.02	3.18	
	91日	0.236		0.982	3.10	
AE	7日	0.299	31.1	1.42	3.53	0.00120
	28日	0.256		1.22	3.38	
	91日	0.203		0.969	3.13	

進中性化試験条件下における、フライアッシュの置換率が0%および30%の配合の供試体の中性化深さ予測式の諸係数である。

表一2より、促進試験下において初期水中養生材令7日の場合、91日の場合に比べ non AE コンクリートで約1.2倍、AE コンクリートで約1.5倍の中性化深さを示すこととなる。

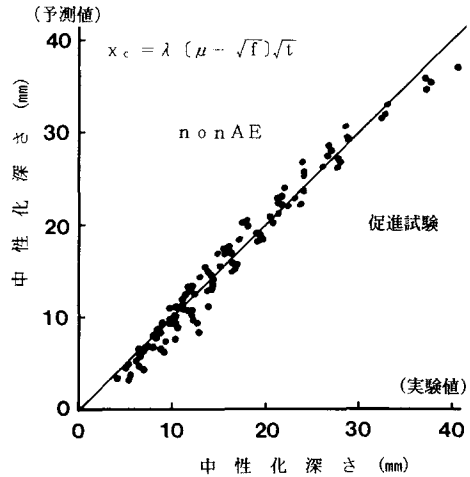
これらの式を用いた予測値と実験値の一例を図一12および図一13に示す。他の場合も高い相関を示すことから、コンクリートの中性化深さは式(1)、(2)または(7)を用いて予測可能であると考えられる。配合条件として水結合材比を用いる場合には式(1)を、材令28日の圧縮強度を用いる場合には式(2)または(7)を用いて中性化深さを予測することができる。

一方、自然暴露試験の場合<sup>6)</sup>、配合条件としては、本研究と同様に単位結合材量を250, 290, 330 kg/m<sup>3</sup>、フライアッシュの置換率を0, 30%, 初期水中養生材令を1, 7, 28, 91日(屋内の場合には、7日と91日のみ)とし、AE剤等の混和剤は一切用いていない。供試体は雨のかかる屋外(東京にある地下1階地上5階の鉄筋コンクリート建造物の屋上)および屋内(同じ建造物の地下の物置)の2か所に設置し、材令2, 5, 10, 15年において中性化深さを測定した。

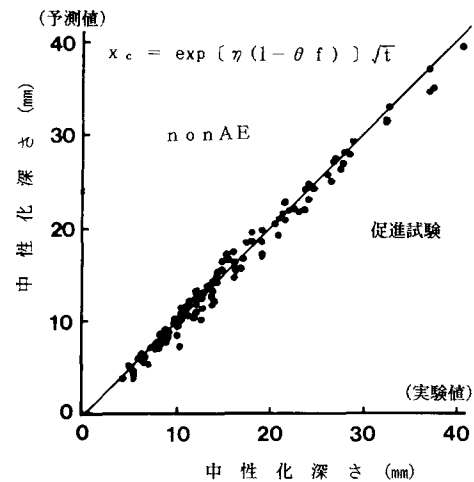
屋外の場合、降雨により二酸化炭素の拡散が一時期遮断されることおよび水和反応が進行することにより、屋内の場合に比べ中性化深さの進行が遅延され、中性化深さは材令の平方根に比例せず、材令の4乗根と高い相関を示した。促進中性化試験は、温度、湿度および二酸化炭素濃度を一定に保っていることから、屋内の環境をシミュレートしていると考えられる。実際、屋内に設置した供試体の中性化深さは材令の平方根と高い相関を示している。そこで、促進試験と同様に式(1)、(2)および(7)を仮定し、屋内自然暴露試験結果を用い最小2乗法により係数を決めると表一3のようになる。ただし、自然暴露試験の場合、(4)と同様の検討を行った結果、式(1)のkを0.3とした。

表一3 中性化深さ予測式の諸係数 (自然暴露試験)

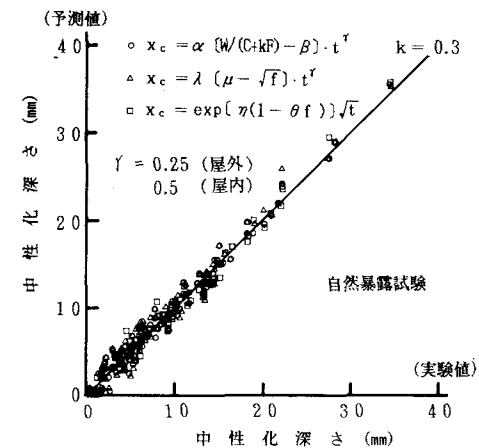
初期水中養生材令	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	$\mu$	$\eta$	$\theta$
屋外	7日	0.0376	37.8	0.116	1.07	0.00162
	91日	0.0287		0.0876	0.804	



図一12 実験値と予測値 (促進試験)



図一13 実験値と予測値 (促進試験)



図一14 実験値と予測値 (自然暴露試験)

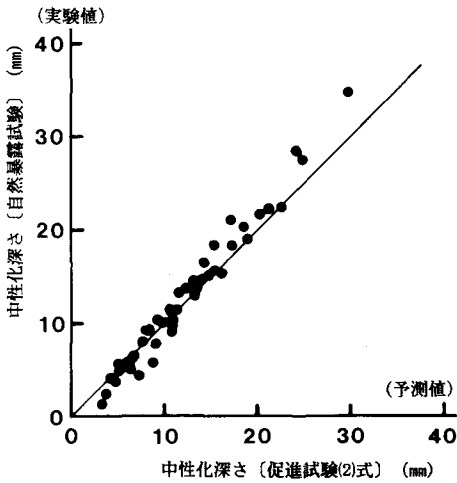


図-15 促進試験による中性化深さの予測

これらの式を用いた予測値と実験値とを図-14に示す。屋外の場合も中性化係数  $[b : x_c = bt^{\frac{1}{2}}]$  を有効水結合材比または圧縮強度で表わし、屋内の結果とともに図-14に示した。この図より、促進試験と同様に長期材令においても有効水結合材比または圧縮強度を用いて

中性化深さを予想することが可能である。

促進試験における non AE コンクリートの結果から求めた  $\lambda$  および  $\mu$  (表-2) を用い、式 (2) に自然暴露試験に用いた供試体の圧縮強度を代入することにより得られる中性化係数と屋内における自然暴露試験結果により得られる中性化係数とを比較することにより、自然暴露試験における 2, 5, 10, 15 年はそれぞれ促進試験における 0.56, 1.40, 2.81 および 4.21 週に対応する。そこで、自然暴露試験結果と促進試験により得られた式 (2) に自然暴露試験に用いた供試体の圧縮強度を代入して、それぞれの材令において推定した中性化深さを図-15に示すが、本研究で用いた促進試験により屋内に自然暴露した供試体の中性化深さを予想することができるものと考えられる。

(7) 微細組織による検討

水銀圧入法によって得られた材令 15 年自然暴露試験 (屋内) のコンクリート中のペースト部分の全細孔量を図-16に示す。全体的には、単位結合材量の増加とともに全細孔量は減少しており、中性化深さと同様の傾向を示している。フライアッシュ無混和 (フライアッシュの置換率が 0%) の場合、中性化により全細孔量は減少

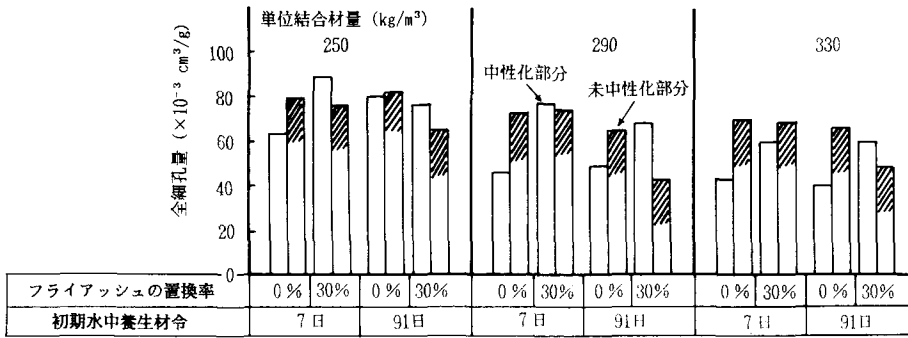


図-16 全細孔量 (屋内自然暴露試験)

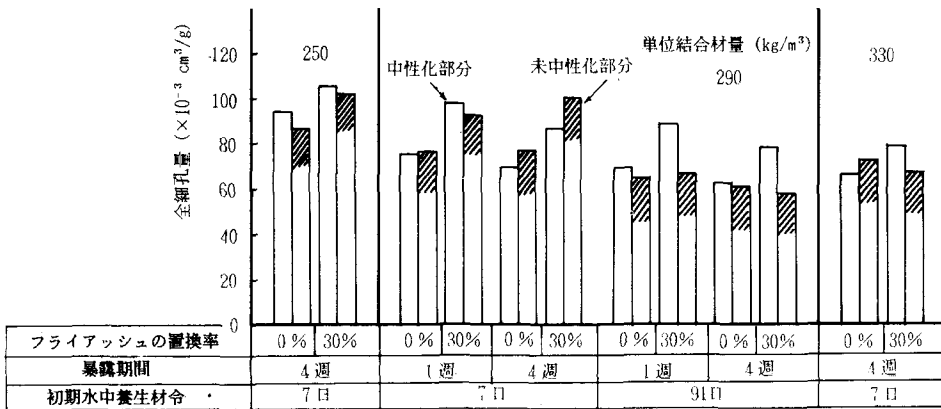


図-17 全細孔量 (促進中性化試験)

しているが、これは、水酸化カルシウムが二酸化炭素と反応し、炭酸カルシウムが生成する際、体積が増加するため全細孔量が減少したものと考えられる。セメントの30%をフライアッシュで置換した場合、ポゾラン反応により未中性化部分の全細孔量はフライアッシュ無混和のコンクリートに比べ減少し、さらに、初期の水中養生材令を7日から91日に増加させることにより全細孔量は減少し、フライアッシュ無混和のコンクリートとの差は大きくなっている。しかし、屋内のように水分の補給がなく、初期の水中養生材令が7日のように短い場合には、91日とは異なり、フライアッシュの影響はほとんど認められない。一方、中性化部分の全細孔量は、セメントの30%をフライアッシュで置換することにより増大しており、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの場合と同様の傾向を示した<sup>15)</sup>。フライアッシュを用いた場合にも中性化によって炭酸カルシウムが生じるため、フライアッシュ無混和のコンクリートと同様に全細孔量は減少すると考えられるが、同時に中性化により水酸化カルシウムが消費されることおよび乾燥によりコンクリート中の水分が逸散することにより、ポゾラン反応が抑制され、全細孔量が増大したものと考えられる。このことは、電子顕微鏡によるフライアッシュ粒子表面の反応層の観察によっても確認された。未中性化部分では水和反応によりフライアッシュ粒子表面に厚い反応層が形成され、ポゾラン反応の進行が確認されたが、中性化部分に存在するフライアッシュ粒子は、未中性化部分のフライアッシュに比べ表面が滑らかなままの粒子が多くみられ、ポゾラン反応がほとんど進行していないことが確認された。以上のように全細孔量も環境条件、初期水中養生材令に大きく影響を受けているが、全細孔量のみを考えた場合、中性化部分に関しては中性化深さに対応し、セメントの30%をフライアッシュで置換することにより全細孔量が増加するものの、未中性化部分ではポゾラン反応によりフライアッシュを用いたコンクリートの全細孔量はフライアッシュ無混和のコンクリートに比べ著しく減少し、中性化の進行に対しては、抑制する傾向を示している。しかし、セメントの30%をフライアッシュで置換した場合、セメント量の減少とポゾラン反応によって水酸化カルシウム量が低下するため、中性化に対しては不利となっていることから、中性化深さもフライアッシュを用いることにより増大したものと考えられる。

一方、促進中性化試験に用いた供試体のペースト部分の全細孔量を図-17に示す。促進試験の場合も、単位結合材量および初期水中養生材令の増加とともに全細孔量は減少しているが、自然暴露試験の供試体よりも全細孔量は増大している。自然暴露試験の材令15年にはば

対応している暴露期間4週の供試体（一例として単位結合材量  $290 \text{ kg/m}^3$  の場合）について検討を加えると、自然暴露試験の場合とは異なり初期水中養生材令7日の供試体の未中性化部分の全細孔量はフライアッシュの置換により増大しており、91日の場合にはほぼ同じ値を示している。これは、自然暴露試験に比べ促進試験は温度および湿度の環境条件が厳しく、さらには暴露期間が4週と短いため、ポゾラン反応がほとんど生じていないものと考えられ、自然暴露試験と異なった結果となっている。

中性化部分に関しては、フライアッシュを用いたコンクリートの全細孔量は自然暴露試験の場合と同様に、フライアッシュ無混和に比べ増大する傾向を示している。しかし、フライアッシュ無混和のコンクリートの全細孔量は自然暴露試験の場合とは異なり、中性化により減少するとは限らないことから、苛酷な環境条件のために十分な養生が行えず組織自身がゆるんだものと考えられる。

(6)より、促進中性化試験により自然暴露のコンクリートの中性化深さを予測することが可能であることが明らかとなったが、微細組織に関しては必ずしも促進中性化試験と自然暴露試験の供試体の全細孔量は同じ傾向を示すわけではない。しかし、二酸化炭素が拡散する中性化部分に関しては、両試験とも同様の傾向を示すことから、促進中性化試験により自然暴露のコンクリートの中性化深さを予測することが可能となったものと考えられる。

#### 4. 結 論

本研究は、コンクリートの中性化深さに及ぼす初期水中養生材令、単位結合材量、フライアッシュの混和等の影響について、促進中性化試験を行い検討を加えるとともに、自然暴露試験結果と比較することにより、長期材令時のコンクリートの中性化深さの予測について検討を加えた。本研究により得られた主な結論は次のようになる。

(1) 促進中性化試験を行った供試体の中性化深さは暴露期間の平方根に比例する。

(2) 初期水中養生材令はコンクリートの中性化深さに大きく影響を及ぼし、特にフライアッシュを混和した場合には十分長い初期水中養生が必要である。

(3) セメントの一部をフライアッシュで置き換えた場合中性化深さは増大するものの、単位結合材量および初期水中養生材令の増大によりその影響は低減される。

(4) 中性化深さはコンクリートの組織に影響を受けることから、フライアッシュの置換の有無によらずコンクリートの中性化深さはフライアッシュの効果を考慮し



た有効水結合材または水中養生材令 28 日の圧縮強度を用いて推定可能である。

(5) 促進中性化試験により屋内に自然暴露したコンクリートの中性化深さを推定することができる。

謝 辞：本研究の実験を行うにあたり、当時学生であった金銀謙氏（京畿工業開放大学）と荒井俊晴氏（神奈川県）に多大な援助をいただいた。ここに感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Tsukayama, R., Abe, H. and Nagataki, S. : Longterm Experiments on the Neutralization of Concrete Mixed with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. III, IV-30~IV-35, 1980.
- 2) Kurz, M. : The Influence of Extremely Short-Term Curing on the Rate of Carbonation in Concrete, Proceedings of the RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, pp. 250~257, 1984.
- 3) Ho, D. W. S. and Lewis, R. K. : Carbonation of Concrete and its Prediction, Cement and Concrete Research, Vol. 17, pp. 489~504, 1987.
- 4) Wierig, H. J. : Longtime Studies on the Carbonation of Concrete under Normal Outdoor Exposure, Proceedings of the RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, pp. 239~244, 1984.
- 5) 依田・横室：各種セメントを用いたコンクリートの中性化深さ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 1, pp. 327~332, 1987.
- 6) Nagataki, S., Ohga, H. and Kim, E. K. : Effect of Curing Conditions on the Carbonation of Concrete with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement in Long-Term Tests, ACI SP-91, pp. 521~540, 1986.
- 7) 長瀧・大賀・金：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化に関する研究，セメント技術年報，Vol. 40, pp. 419~422, 1986.
- 8) たとえば，Hamada, M. : Neutralization (Carbonation) of Concrete and Corrosion of Reinforcing Steel, Proceedings of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Vol. III, pp. 343~369, 1968.
- 9) Nischer, P. : Effect of Environment and Concrete Quality on Carbonation, Betonwerk+Fertigteile-Technik, Heft 11, pp. 752~757, 1984.
- 10) 岸谷：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，pp. 147~149, 1963.
- 11) 和泉・嵩・押田・西原：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類，調合および養生条件の影響について，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 117~120, 1985.
- 12) Smolczyk, H. G. : Physical and Chemical Phenomena of Carbonation, Proceedings of RILEM International Symposium on Carbonation of Concrete, Theme 1, Paper 1, 1976.
- 13) Shewmon, P. G. (笛木・北澤共訳) : Diffusion in Solids (固体内の拡散)，コロナ社，1980.
- 14) Weber, H. : Methods for Calculating the Progress of Carbonation and the Associated Life Expectancy of Reinforced Concrete Components, Betonwerk+Fertigteile-Technik, Heft 8, pp. 508~514, 1983.
- 15) 長瀧・大賀・荒井：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，pp. 143~150, 1987. (1987. 9. 7・受付)