

# [30] 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

正会員 ○和泉 意登志 (竹中工務店技術研究所)  
 正会員 嵩 英雄 (竹中工務店技術研究所)  
 正会員 押田 文雄 (竹中工務店技術研究所)  
 西原 邦明 (竹中工務店技術研究所)

## 1. まえがき

一般に、鉄筋コンクリート構造物の耐久性はコンクリート内部の鉄筋腐食によって左右されるといっても過言ではない。コンクリート中の鉄筋が腐食する原因の1つとして鉄筋の周囲のコンクリートの中性化が挙げられ、通常環境下にある鉄筋コンクリート構造物の場合にはコンクリートの中性化が支配的となる<sup>1)</sup>。中性化に及ぼす要因とその効果については数多くの報告があり、これまでに種々の中性化速度式が提案されている。しかし、近年のセメント、骨材並びに混和剤の品質の変化や多様化などによって、現在使用されているコンクリートは旧来のものとは物性が相違してきており、中性化の進行性状も異ってきていることも考えられる。

本報告は、現在使用されているコンクリートの中性化に及ぼす各種要因効果を定量的に把握することを目的として、セメントの種類、混和剤の種類、水セメント比を内的因子とし、養生条件を外的因子として取り上げ、これらの中性化速度に及ぼす要因効果を検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の組合せ

実験は、セメントの種類、水セメント比および表面活性剤を因子としたシリーズ1とセメントの種類、水セメント比および養生条件を因子としたシリーズ2の二つから成っている。二つのシリーズをまとめた実験の組合せを表-1に示す。またシリーズ2の養生条件の内容を表-2に示す。

### 2.2 供試体の製作

コンクリートの調合は、スランブ 18cm 空気量 4% (A E 剤, A E 減水剤使用の場合) を目標に試し練りによって決定した。供試体は、シリーズ1では10×10×40cmの角柱体、シリーズ2ではφ10×20cmの円柱体であり、打設後 20℃, 95% R.H. の養生室に2日間静置し、その後脱型して所定の養生条件下で養生を行った。なおシリーズ1の養生条件は、材令9週ま

表-1 実験の組合せ

記号	セメントの種類	水セメント比 (%)	混和剤の種類	実験シリーズ
N-45-PL	普通ポルトランドセメント	45	無	1
" " AEG			A E 剤	
" " AEG		A E 減水剤	2	
N-50-PL		50	無	1
" " AEG			A E 剤	
" " AEG		A E 減水剤	2	
N-55-PL		55	無	1
" " AEG			A E 剤	
" " AEG		A E 減水剤	2	
N-60-PL		60	無	1
" " AEG			A E 剤	
" " AEG		A E 減水剤	2	
N-65-PL	65	無	1	
" " AEG		A E 剤		
" " AEG	A E 減水剤	2		
N-70-PL	70	無	1	
" " AEG		A E 剤		
" " AEG	A E 減水剤	2		
H-45-AEG	早強ポルトランドセメント	45	A E 減水剤	1
H-50-AEG		50	無	
H-55-AEG		55	A E 剤	
H-60-PL		60	A E 減水剤	
" " AEG	60	A E 減水剤	2	
" " AEG	65	A E 減水剤	1	
BA-45-AEG	高炉セメント (A種)	45	A E 減水剤	1
BA-50-AEG		50	無	
BA-55-AEG		55	A E 剤	
BA-60-PL		60	A E 減水剤	
" " AEG	60	A E 減水剤	2	
BA-65-AEG	65	A E 減水剤	1	
BB-45-AEG	高炉セメント (B種)	45	A E 減水剤	1
BB-50-AEG		50	無	
BB-55-AEG		55	A E 減水剤	
BB-60-PL		60	A E 減水剤	
" " AEG	60	A E 減水剤	2	
BB-65-AEG	65	A E 減水剤	1	
FA-45-AEG	フライアッシュセメント (A種)	45	A E 減水剤	1
FA-40-AEG		50	無	
FA-55-AEG		55	A E 剤	
FA-60-PL		60	A E 減水剤	
" " AEG	60	A E 減水剤	2	
FA-65-AEG	65	A E 減水剤	1	

表-2 実験シリーズ2におけるコンクリートの養生条件

記号	水中養生温度(℃)	内	訳
I	10	○—△—□	凡例 ○ コンクリート打設 — 水中養生 - - - 20℃-60% R.H.
II	10	○—△—□	
III	20	○—△—□	
IV	20	○—△—□	
V	30	○—△—□	
VI	30	○—△—□	
打設から養生終了までの材令		0 1週 4週 5週 8週	

で20℃水中養生，以後材令13週まで実験室において乾燥および打込み面，底面並びに両端面のシーリングを行った。

### 2.3 実験方法

供試体は所定の養生を終えた直後から、温度30℃，相対湿度60%，炭酸ガス濃度5%の中性化加速試験室に静置した。シリーズ1では、加速材令8，13および26週において端部から約5cmの距離を割裂し、割裂面に1%フェノールフタレインエタノール溶液（JIS K 8006）を噴霧し、コンクリート表面から赤着色部までの平均距離を中性化深さとした。中性化深さ測定後は、割裂面をエポキシ樹脂を用いてシーリングした。シリーズ2では、加速材令4，8，13および26週において、それぞれ二本の供試体の圧縮試験を行った。次に、供試体を割裂し、割裂面に上記の試薬を噴霧し、コンクリート表面（側面）から赤着色部までの平均距離を中性化深さとした。

### 3. 実験結果および考察

中性化深さのデータは、中性化深さ  $x$  (cm) が時間  $t$  (年) の平方根に比例するという  $\sqrt{t}$  則を基に、 $x=A\sqrt{t}$  (ここに  $A$  は中性化速度係数) の回帰式を求め、中性化速度係数の値  $A$  で評価することにした。実験結果をまとめて表-3に示す。いずれの回帰式においても相関係数は0.9以上であり、コンクリート表面が平面の場合でも  $\phi 10$ cmの曲面の場合でも  $\sqrt{t}$  則に従うと判断してさしつかえないようである。

ここで、同一条件においてもコンクリート表面が平面と曲面の場合では中性化速度係数  $A$  が異なることに注意しておかなければならない。従ってシリーズ1の実験結果とシリーズ2の実験結果を同じ指標で比較するための尺度が必要となってくる。そこで、シリーズ1の中性化加速試験開始時の圧縮強度とシリーズ2の養生条件Mの中性化加速試験開始時の圧縮強度がほぼ等しいことに着目し、シリーズ1では(N-60-AEG)の  $A$  の値を1.00とし、シリーズ2では(N-60-AEG)の養生条件Mの場合の  $A$  の値を1.00としてシリーズごとに中性化率を求めた。この中性化率を指標として中性化速度に及ぼす各種要因効果の検討を行うことにした。

#### 3.1 セメントの種類の影響

シリーズ1より、セメントの種類および水セメント比が中性化率に及ぼす影響を図-1に、シリーズ2よりセメントの種類および養生条件が中性化率に及ぼす影響を図-2に示す。図-1より、同一水セメント比においては中性化率の順位はセメントの種類によって異なるが、その範囲は10%以内と小さい。また図-2より、中性化率とセメントの種類の関係は養生条件によって著しく異なっている事がわかる。普通セメントでは水中養生期間が4週の場合が1週

表-3 実験結果のまとめ(中性化速度係数)

記号	実験シリーズ	実験シリーズ2 養生条件					
		I	II	III	IV	V	M
N-45-PL	2.14						
" " AE	2.60						
" " AEG	2.42	2.59	2.16	2.50	2.05	2.64	1.86
N-50-PL	2.53						
" " AE	2.47						
" " AEG	2.66	3.63	3.08	3.74	3.05	3.44	2.80
N-55-PL	2.67						
" " AE	3.01						
" " AEG	2.82	4.22	3.58	4.29	3.33	3.80	2.96
N-60-PL	3.24						
" " AE	3.45						
" " AEG	3.34	4.83	4.05	4.68	3.99	4.57	3.88
N-65-PL	4.43						
" " AE	4.24						
" " AEG	4.28	5.43	4.71	5.41	4.21	5.49	4.00
N-70-PL	5.13						
" " AE	5.06						
" " AEG	5.33	6.83	6.11	6.68	5.67	6.44	5.17
H-45-AEG	1.90						
H-50-AEG	2.48						
H-55-AEG	3.27						
H-60-PL	3.08						
" " AE	3.40						
" " AEG	3.41	3.63	3.94	3.82	3.98	3.75	3.79
H-65-AEG	4.29						
BA-45-AEG	2.07						
BA-50-AEG	2.73						
BA-55-AEG	2.90						
BA-60-PL	3.00						
" " AE	3.67						
" " AEG	3.78						
BA-65-AEG	4.32						
BB-45-AEG	2.04						
BB-50-AEG	2.40						
BB-55-AEG	3.06						
BB-60-PL	3.35						
" " AE	3.79						
" " AEG	3.82	7.00	6.06	6.90	5.01	5.57	4.44
BB-65-AEG	4.55						
FA-45-AEG	2.32						
FA-50-AEG	2.89						
FA-55-AEG	3.34						
FA-60-PL	2.97						
" " AE	4.27						
" " AEG	3.57	5.28	5.19	5.06	4.78	4.72	4.41
FA-65-AEG	4.16						

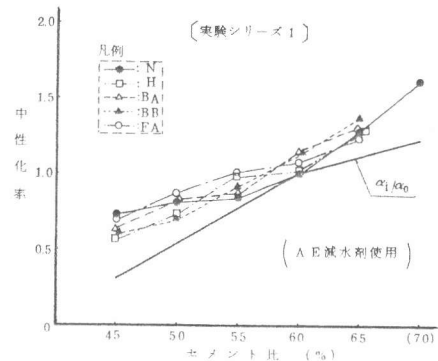


図-1 セメントの種類および水セメント比の影響

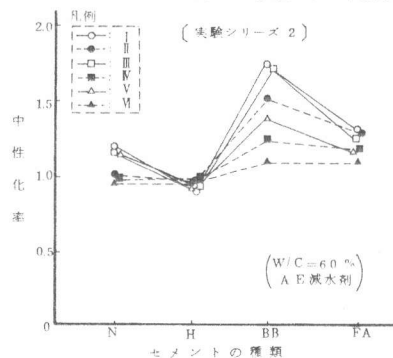


図-2 セメントの種類および養生条件の影響

場合より中性化率が小さいが、水温の差はほとんどない。早強セメントでは、養生条件にかかわらずほぼ一定で、中性化率はほぼ1.0に近い。高炉セメントB種では、養生条件によって中性化率は大きく異なり、1.1~1.8となっている。つまり強度発現条件が優れたものほど中性化しにくいことがわかる。フライアッシュセメントA種では、高炉セメントB種と同様の傾向にあるが、中性化率は1.1~1.3とその差は少ない。以上のことを総合的に検討すると、セメントの種類による中性化率は、従来の中性化速度式<sup>2)</sup>で用いられてきた一定の中性化比率とは異なり、養生条件によって大きく影響されるものであることがわかった。この養生条件の影響は水和反応速度が早いセメントほど小さくなる。また逆の見方をすれば、水和反応が遅いセメントでも十分な養生を行ってやれば、普通セメントの場合に近い中性化比率にすることが可能であると考えられる。

### 3.2 水セメント比の影響

水セメント比の影響は、先に示した図-1と、中性化率と水セメント比の関係を養生条件別に表わした図-3により検討できる。図-1および図-3には、従来から最も一般的に用いられてきた岸谷式<sup>2)</sup>において水セメント比の中性化速度に及ぼす係数 $\alpha_i$ を以下の式によって求め、水セメント比60%のときの値 $\alpha_0$ で $\alpha_i$ を除いた値 $\alpha_i/\alpha_0$ を太い実験で示してある。この $\alpha_i/\alpha_0$ の値は、本実験の中性化率に対応するものである。

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{(x-0.25)^2}{0.3(1.15+3x)}} \quad (x \geq 0.6) \quad \alpha_i = \sqrt{\frac{(4.6x-1.76)^2}{7.2}} \quad (x \leq 0.6)$$

ここに、 $\alpha_i$  : 中性化速度に及ぼす係数,  $x$  : 水セメント比

図-1より、中性化率は水セメント比が大きくなるに従って大きくなるが、その増加率はセメントの種類によって若干異なっているが大きな差ではない。また図-3より、図-1の場合と同様に水セメント比が大きくなるに従って中性化率は大きくなるが、その増加率は養生条件によってほとんど左右されないようである。本実験結果における中性化率と水セメント比の関係は、水セメント比45%から65%の範囲においてはほぼ直線的に増加し、65%を過ぎると直線の勾配が大きくなるという傾向にあった。これらの結果は、岸谷式に示された水セメント比60%を境に、60%以下では勾配が大きく、60%以上では勾配が小さくなることとは合致していなかった。この原因は、使用したコンクリートの材料や調合が当時と異なっていること、および中性化加速試験方法の相違等によるものと考えられる。

### 3.3 混和剤の影響

シリーズ1より中性化率と混和剤の種類および水セメント比の関係を図-4に、中性化率と混和剤の種類およびセメントの種類<sup>2)</sup>の関係を図-5に示す。また混和剤の影響を統計的に検討するため、それぞれについて、二元配置の分散分析を行った。分散分析結果を表

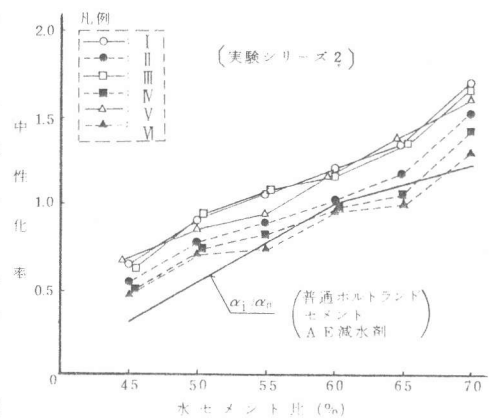


図-3 水セメント比および養生条件の影響

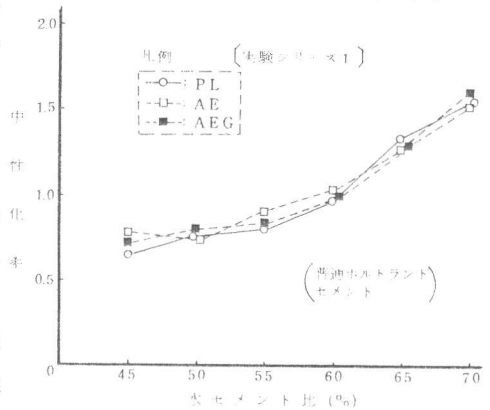


図-4 混和剤の種類および水セメント比の影響

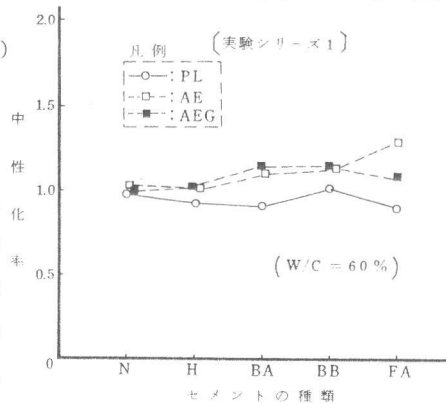


図-5 混和剤の種類およびセメントの種類の影響

表-4 図-4の分散分析結果

要因	平方和	自由度	不偏分散	分散比	寄与率
水セメント比	18.14	5	3.63	171.6**	98
混和材	0.05	2	0.03	1.3	0
残差	0.21	10	0.02		2
計	18.40	17			100

表-5 図-5の分散分析結果

要因	平方和	自由度	不偏分散	分散比	寄与率
セメント種類	0.29	4	0.07	1.21	3
混和材	0.95	2	0.48	7.89*	48
残差	0.48	8	0.06		49
計	1.72	14			100

備考) \*\*: 1%有意, \*: 5%有意

—4 および表—5 に示す。図—4 および表—4 より、普通セメントの場合は、同一水セメント比なら混和剤の種類によって中性化率は変化しないことがわかった。また、図—5 および表—5 より、普通セメントの場合を除きブレンコンクリートの中性化率は A E 剤または A E 減水剤を使用したコンクリートの場合より若干小さい傾向にあることがわかった。A E 剤と A E 減水剤の場合の差はほとんどないようである。岸谷式に示されている表面活性剤の中性化比率 R の比は (ブレン) : (A E 剤) : (A E 減水剤) = 1.0 : 0.6 : 0.4 であり、表面活性剤を用いると中性化比率が著しく減少するという内容となっている。この内容は本実験結果と異なっている。この理由は岸谷式で用いる水セメント比が、A E 剤や A E 減水剤を用いることによって増加する空気量に対応する強度低下を見込んだ補正を行った後の強度上の水セメント比で、実際の水セメント比ではないことおよび使用コンクリートの材料や調合の相違によるものと考えられる。

今日では、水セメント比を実際の水セメント比として用いる場合がほとんどであるため、この場合の混和剤の種類による中性化率の差は無視しても大きな誤りをおかすことはないと思われる。

### 3.4 コンクリートの圧縮強度との関係

ここでは、通常、コンクリートの代表特性と考えられている圧縮強度を指標とし、圧縮強度と中性化速度の関係について検討することにする。シリーズ 2 の実験では、各養生条件において水中養生後、20°C、60% R H の乾燥室に置いて 4 週間乾燥させ、中性化加速試験中に圧縮強度が水和によって変化しないように計画してある。中性化加速試験において材令 4, 8, および 13 週においては計画通り圧縮強度は各条件ごとにほぼ一定の値を示していた。このため、中性化加速材令 4 週の圧縮強度  $\sigma_c$  を指標として用いることにする。圧縮強度  $\sigma_c$  の逆数  $1/\sigma_c$  と中性化比率の関係プロットしたのが図—6 である。図—6 より、圧縮強度の逆数  $1/\sigma_c$  と中性化率  $r$  の関係は、一本の直線関係で示され、この直線の相関係数は 0.93 と非常に高い相関を示していた。このことは、水セメント比、セメントの種類および養生条件にかかわらず、それらの影響をすべて包含した結果と考えられるコンクリートの圧縮強度を指標とすれば中性化率が求められることを示している。

### 4. まとめ

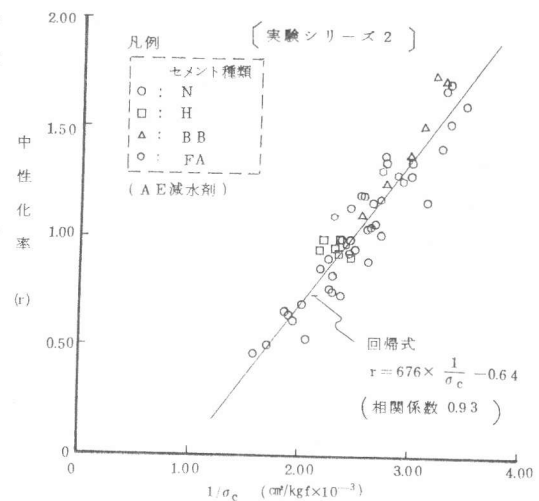
各種の要因が中性化速度に及ぼす影響を、中性化加速試験を用いて検討した結果、以下の事項が判明した。

- 1) セメントの種類が異なると中性化速度が異なってくるが、この差異は養生条件によって著しく影響される。
- 2) 水セメント比が大きくなると中性化速度がほぼ直線的に大きくなり、 $w/c$  が 65% を越すと増加の割合が増す。
- 3) A E 剤や A E 減水剤を使用しても、ブレンに比較して、中性化速度が遅くなることはなくほぼ同等である。
- 4) セメントの種類および養生条件にかかわらず、圧縮強度の逆数と中性化速度は直線関係にある。

なお、今後自然条件に暴露中のデータを蓄積し、本実験結果を検証する予定である。

### (参考文献)

- 1) 嵩, 和泉他; 経年 R C 構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集 1984 年
- 2) 例えば岸谷; 鉄筋コンクリートの耐久性, 鹿島建設技術研究所出版部 昭和 38 年 2 月
- 3) 友沢; 中性化による問題, 施工, 1985 年 1 月
- 4) 例えば日本建築学会; 建築工事標準仕様書・同解説 B J A S S 5 鉄筋コンクリート工事 昭和 35 年 8 月



図—6 圧縮強度と中性化率の関係