

論文

[1103] 降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化

正会員○佐伯竜彦（新潟大学建設学科）

正会員 長滝重義（東京工業大学土木工学科）

正会員 大賀宏行（東京工業大学土木工学科）

高見浩之（新潟大学建設学科）

1. まえがき

コンクリートの中性化深さを予測することは、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を考える上で非常に重要である。中性化深さの予測において最も確実な方法はコンクリート供試体を同じ環境下に暴露し、経時的に中性化深さを測定することである。しかし、中性化深さと暴露時間の関係式を回帰的に求めるには少なくとも3～4材令の測定が必要であり、時間的には10～20年程度の長期間を要する。このため、一般的には促進中性化試験が行われている。促進試験は二酸化炭素濃度を5～20%とし、濃度と共に温度および湿度を一定に保持した条件下で行われる。この結果によって、中性化速度に及ぼす水セメント比、初期養生条件等の影響を評価する研究が数多く行われてきた[1]。また、促進試験の結果から屋内自然暴露試験の結果を予測することも可能となっている[2]。

屋外に暴露されたコンクリートは屋内に比べ二酸化炭素濃度が低いことと共に雨による水分の供給で中性化の進行が遅いことが知られている[3]。促進試験では試験開始から供試体が乾燥していくのに対し、屋外では水分の供給があるため促進試験と屋外暴露試験には中性化の機構に違いがあるものと考えられる。このため、従来の促進試験の方法で屋外暴露試験の結果を評価することは明らかに無理があるものと思われる。そこで本研究では、促進試験中に定期的にモルタル供試体に水分を供給する、散水促進中性化試験を行い、屋外に暴露されたコンクリートの中性化深さの予測法について検討を加えた。

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	S/C	flow (mm)	空気量 (%)
45	648.6	291.8	2.03	173	5.2
55	573.6	315.5	2.30	214	4.2
65	514.2	334.2	2.57	241	4.3

2. 実験概要

本研究では、促進および散水促進中性化試験はモルタル供試体、屋内および屋外暴露試験にはコンクリート供試体を用いて実験を行った。

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、モルタルの細骨材は豊浦標準砂、相馬砂の細、粗砂の三種を同重量混合して用いた。コンクリートは細骨材、粗骨材とも相模川産の天然骨材を用いた。

2.2 配合

モルタルの配合は水セメント比を45、55、65%の三種類とし、ペーストと骨材の体積比が同一となるように決定した。配合を表-1に示す。

コンクリートの配合は単位セメント量を250、290、330kgf/m<sup>3</sup>の三種類（水セメント比はそれ

ぞれ60.8、52.5、46.2%)とし、スランブ5cmとなるよう決定した。配合を表-2に示す。

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
46.2	330	152	3.9	4.8	2.3
52.5	290	151	4.0	5.3	2.1
60.8	250	152	4.2	5.0	3.0

### 2.3 供試体

モルタル供試体は4×4×16cmの角柱供試体であり、所定の初期養生終了直後、底面を除いた他の5面をエポキシ系の接着剤でシールした。この時、供試体内部の水分が蒸発しないように留意した。

コンクリート供試体はφ15×30cmの円柱供試体を用い、シールは行わなかった。

### 2.4 初期養生

モルタル供試体の初期養生期間は3、7、28および91日間の4種類で、水セメント比55%のみ1日養生も行った。供試体は打設後24時間で脱型し、初期養生として所定の材令まで20℃の水中養生を行った。

コンクリート供試体の初期養生期間は1、7、28および91日の4種類である。ただし、屋内暴露供試体の場合は7および91日の2種類のみである。

### 2.5 試験方法

#### (1) 促進中性化試験

シール硬化後(シール後2時間程度)、供試体を促進装置内に設置した。促進条件は温度40℃、相対湿度50%、二酸化炭素濃度15%とした。中性化深さの測定は、所定の材令で供試体の軸方向端部から25mmの厚さで割裂し、その断面にフェノールフタレインの1%エタノール溶液を吹き付け、未着色部分を中性化部分として測定を行った。

#### (2) 散水促進中性化試験

促進中性化試験中に毎日3時間の散水を行った。散水量は毎分1.5ℓでシャワー状の水を供給した。その他の条件および中性化深さの測定方法などは促進中性化試験の場合と同様である。

#### (3) 自然暴露試験

屋内暴露供試体は東京工業大学内の鉄筋コンクリート構造物の地下1階の階段下に、屋外暴露供試体は同じ建物の5階屋上に設置した。

#### (4) 水酸化カルシウム量の測定

水酸化カルシウム量は供試体表面から5mmごとに試料を採取し、熱重量分析によって測定した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 中性化深さの経時変化

図-1に促進および散水促進中性化試験を行ったモルタル供試体の中性化深さの経時変化を示す。図より、散水を行ったものは行わないものと比べ、中性化の進行が著しく抑制されている。図-2に自然暴露試験を行ったコンクリート供試体の中性化深さの経時変化を示す。屋外暴露されたものは屋内暴露されたものに比べ、中性化の進行が遅くなっており、図-1に示した促進試験結果と同様な関係がみられる。

屋外に暴露されたコンクリートの中性化の進行が屋内に比べて遅いのは、第一に二酸化炭素濃

度が低いこと[3]、第二に雨による水分の供給で長期的に水和が継続し、組織の緻密化が起こるために二酸化炭素の拡散が阻害されること[2]、第三に水分の供給によって未中性化部分から中性化部分へのアルカリ分の拡散があること[4]、第四に水分がコンクリート内の空隙を満たすことによって二酸化炭素の拡散が阻害されること等が挙げられる。散水促進試験の場合、二酸化炭素濃度は通常の促進試験と同濃度であるが、定期的に散水を行うことにより屋外暴露における中性化遅延効果のうち第二、第三および第四の点を再現しているものと思われる。

促進および屋内自然暴露試験を行ったコンクリート（モルタル）の中性化深さの経時変化は促進および暴露期間の平方根に比例することが知られている。また、屋外自然暴露試験については暴露期間の平方根に比例するとする説[5]、4乗根に比例するとする説[2]など諸説があるが、相関係数に大きな差が無いため本研究では平方根に比例するものとした。散水促進試験の結果も平方根で整理した。従って、任意の材令における中性化深さは次式で表すことができる。

$$X_c = b\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、 $X_c$ ：中性化深さ

$b$ ：比例定数

$t$ ：材令（促進期間または暴露期間）

この比例定数 $b$ を中性化係数と定義し、中性化速度の大小をこの係数をもって評価する。

### 3. 2 中性化速度に対する水セメント比の影響

水セメント比は中性化速度に大きな影響をおよぼす要因であることが知られている[5]。図-3に促進および散水促進試験における中性化係数と水セメント比の関係を示す。図より、促進、散水促進試験とも水セメント比が小さいほど中性化係数が小さくなっている。また、促進試験に比べ、散水試験の方が水セメント比の影響が小さくなっている。即ち、水セメント比が

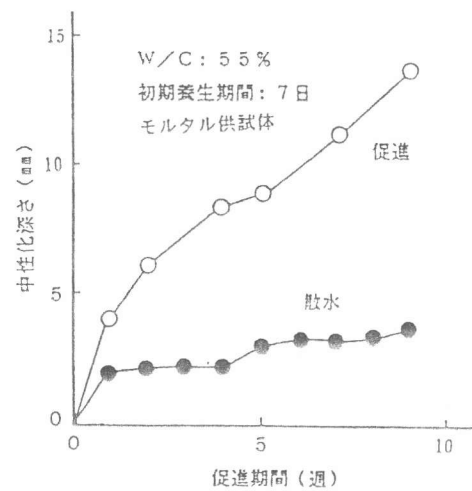


図-1 中性化深さの経時変化（促進試験）

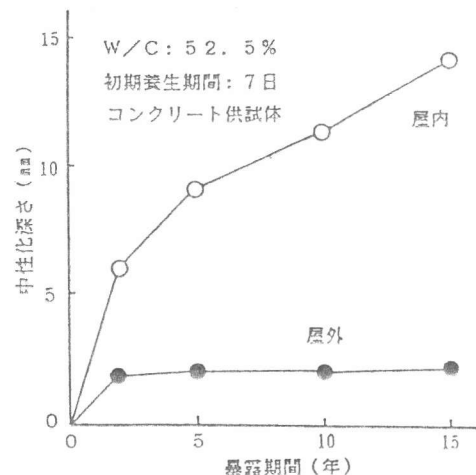


図-2 中性化深さの経時変化（自然暴露）

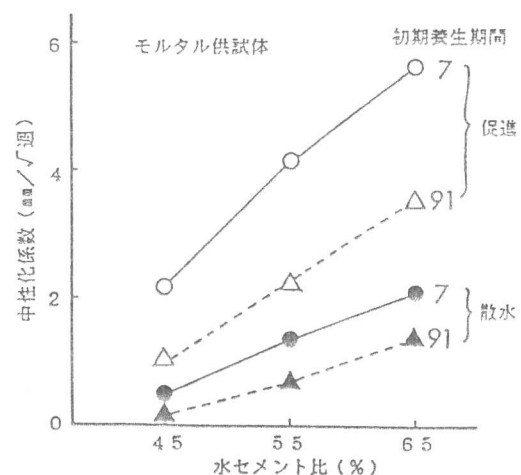


図-3 水セメント比と中性化係数の関係（促進試験）

大きくなっても中性化係数が余り大きくならないという傾向がみられた。

図-4に屋外および屋内自然暴露試験における中性化係数と水セメント比の関係を示す。図より、促進および散水促進試験における場合と同様、水分の供給のある屋外暴露試験の方が中性化係数が小さく、水セメント比の影響が小さくなっている。従って、散水促進試験は屋外自然暴露試験により近い試験方法と言える。

### 3.3 中性化係数に対する初期養生条件の影響

初期養生条件は水セメント比と同様、二酸化炭素の拡散速度に影響をおよぼす組織の緻密化に関係するため、中性化係数に大きな影響をおよぼす[6]。図-5に促進および散水促進試験における中性化係数と初期養生期間の関係を示す。図より、通常の促進試験においては初期養生期間が長くなるほど中性化係数が小さくなり、初期養生1および3日では中性化係数がかなり大きな値となっている。これに対し、散水促進試験においては初期養生期間の影響は小さく、7日養生以降は中性化係数の値はほぼ一定である。これは試験中の水和反応の有無によるものと考えられる。通常の促進試験においては相対湿度を50%に保つため、供試体は試験開始から乾燥し、水和の継続が期待できない。このため、初期養生期間の短いものほど中性化に対して不利となる。しかし、散水促進試験の場合は定期的に水分の供給があるため水和が継続し、促進試験ほど初期養生期間の差が顕著でないものと考えられる。

図-6に促進試験および散水促進試験を行った供試体の水酸化カルシウム量の変化を示す。図より、中性化速度に違いがあるため同じ位置でも試験方法によって水酸化カルシウム濃度が異なるが、通常の促進試験を行ったものは水酸化カルシウムが消失しているのに対し、散水促進試験を行ったものは試験中に内部で水酸化カルシウムが増加している。従って、水分の供給によって水和反応が継続していることが証明さ

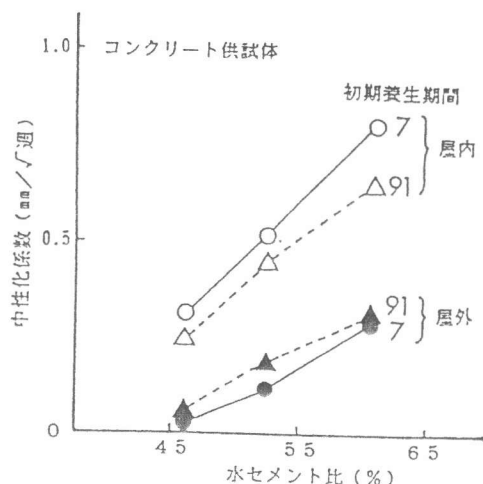


図-4 水セメント比と中性化係数の関係 (自然暴露)

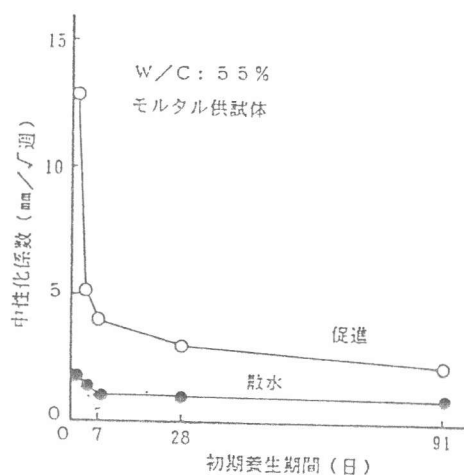


図-5 初期養生期間と中性化係数の関係 (促進試験)

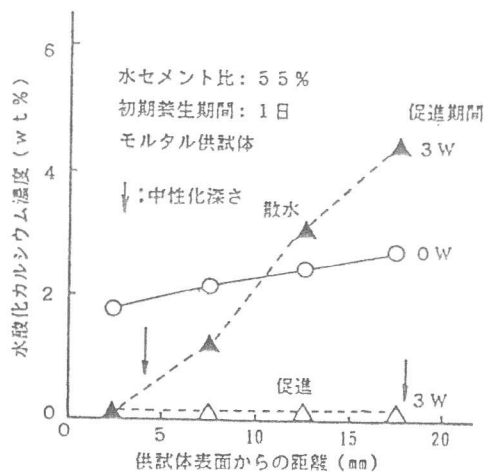


図-6 水酸化カルシウム濃度の変化

れた。

図-7に屋内および屋外自然暴露試験を行った供試体の中性化係数と初期養生期間の関係を示す。図より、屋外暴露試験においては初期養生期間7日以上の場合、中性化係数はほぼ一定であるのに対して、屋内暴露試験では初期養生期間が長くなるほど中性化係数が小さくなるという、図-5と同様な傾向がみられる。従って、水セメント比と同様に初期養生期間の影響についても屋外暴露試験と散水促進試験結果は類似していると考えられる。

### 3. 4 中性化深さの予測

中性化深さを予測するには中性化係数の値を求めれば良いが、一般にその値は水セメント比、圧縮強度等コンクリートの性能を代表すると考えられる要因をパラメータとして定式化されている。本研究では、セメントの種類の変化・混和材の使用等の場合のまで拡張することを考え、汎用性の点からパラメータとして水セメント比ではなく初期養生直後の圧縮強度を用いることとした。中性化係数と圧縮強度の関係については様々な式が提案されているが、本研究では次式を用いることとした[2]。

$$b = A + B\sqrt{f} \quad (2)$$

ここで、b：中性化係数

A、B：実験より求まる定数

f：初期養生直後の圧縮強度

屋外自然暴露試験より求めたA、Bの値を表-3に示す。

次に、散水促進試験と屋外暴露試験との関係についてであるが、散水促進試験における中性化係数を屋外暴露試験同様に次式で表す。

$$b' = A' + B'\sqrt{f'} \quad (3)$$

散水促進試験の結果から屋外自然暴露試験の結果を予測するには、促進試験の1週間が屋外暴露の何年に相当するかという、「促進倍率」

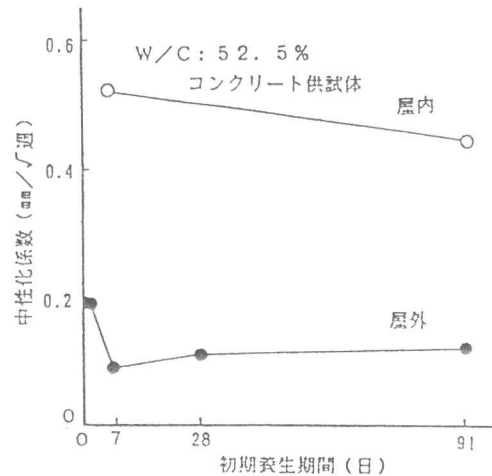


図-7 初期養生期間と中性化係数の関係 (自然暴露)

表-3 式(2)の係数

初期養生期間	A	B
7 日	1.182	-0.069
28 日	1.384	-0.065
91 日	1.647	-0.069

表-4 式(3)の係数(補正後)

初期養生期間	A'	B'
7 日	5.546	-0.298
28 日	5.036	-0.219
91 日	6.958	-0.301

が明確でなければならない。促進倍率は同一圧縮強度における中性化係数の比  $(b'/b)^2$  であるが、圧縮強度にかかわらず  $(b'/b)^2$  の値が一定でなければならない。この条件は  $(A'/A) = (B'/B)$  である。ここで、 $(A'/A)$  と  $(B'/B)$  を計算すると  $(A'/A) = (B'/B)$  とならない。これは、中性化速度を決定する硬化体組織が同じ状態でも、コンクリートとモルタルの強度が供試体の寸法・形状の違い、骨材の違い等のため異なっているためと考えられる。そこで、同一水セメント比、同一初期養生条件の場合にコンクリートとモルタルの圧縮強度が同一となるようにモルタルの圧縮強度を補正して新たに求めた係数  $A'$ 、 $B'$  を表-4に示す。この係数により  $(A'/A)$  と  $(B'/B)$  を求めると、

初期養生7日の場合	$(A'/A) = 4.69$	$(B'/B) = 4.32$
初期養生28日の場合	$(A'/A) = 3.64$	$(B'/B) = 3.37$
初期養生91日の場合	$(A'/A) = 4.22$	$(B'/B) = 4.36$

となり、各係数を最小二乗法で求めたことを考えると、どの初期養生条件においても  $(A'/A) = (B'/B)$  と見なせるものと考えられる。従って、散水促進試験の屋外暴露に対する促進倍率は7日養生の場合約20倍、28日養生の場合約12倍、91日養生の場合約18倍となる。以上のように、本研究の散水促進試験条件によって屋外自然暴露試験の結果を推定できるものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究は屋外で降雨によって水分の供給を受けるコンクリートの中性化速度を評価するためモルタル供試体を用いて散水促進中性化試験を行い、検討を加えた。得られた結論を以下に示す。

- (1) 散水促進中性化試験を行ったモルタル供試体は通常の促進試験を行ったものに比べ中性化の進行が著しく抑制される。
- (2) 降雨により水分の供給を受ける環境下では、中性化速度におよぼす水セメント比および初期養生条件の影響は水分の供給を受けない場合に比べ小さくなる。
- (3) 屋外自然暴露試験における中性化速度に対する配合および初期養生条件の影響を評価するには通常の促進試験より散水促進中性化試験を行った方が良い。
- (4) 散水促進中性化試験の結果によって屋外自然暴露試験の結果を予測することができる。

#### 参考文献

- 1) たとえば、長滝重義・大賀宏行・佐伯竜彦：コンクリートの中性化深さの予測、セメント技術年報、No.41、pp343~346、1987.12
- 2) 大賀宏行・長滝重義：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、土木学会論文集第390号/V-8、pp225~233、1988.2
- 3) 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、pp2~18、1969.
- 4) 大賀宏行・佐伯竜彦・長滝重義：乾湿繰り返しを受けるコンクリートの中性化に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.43、pp418~423、1989.12
- 5) 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、pp147~149、1963.
- 6) Nagataki, S., Ohga, H. and Kim, E.K.: Effect of Curing Conditions on the Carbonation of Concrete with Fly Ash and Corrosion of Reinforcement in Long-Term Tests, ACI SP-91, pp521~540, 1986.