

論文

[1134] 散水促進中性化試験による中性化深さの予測

佐伯竜彦*1・長滝重義*2

1. まえがき

中性化は鉄筋コンクリート構造物の耐久性を考える上で重要な問題であるため、中性化深さの予測に関する研究が数多く行われてきた。自然状態における中性化の進行は非常に遅いため、促進試験による中性化速度の評価が一般的に行われている。促進試験では使用材料、配合条件および初期養生条件の影響を相対的に比較することができるが、促進試験から自然状態の中性化の進行を予測するには自然暴露試験結果との対応関係を明らかにしなければならない。屋内に自然暴露されたコンクリートの中性化速度については、温度、湿度および二酸化炭素濃度を一定に保って行う通常の促進試験によって予測でき、促進倍率も明らかになっている [1]。しかし、屋外に暴露され、降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化の進行については促進倍率等の検討が不十分である。

著者らは促進中性化試験中に供試体に定期的に水分を供給する散水促進中性化試験を行うことにより、屋外に暴露された普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの中性化速度を促進試験から予測できることを示したが [2]、本研究では、フライアッシュを混和したコンクリートについても散水促進中性化試験の適用が可能かどうかについて確認するため、モルタル供試体を作製し、通常の促進中性化試験および散水促進中性化試験を行い検討を加えた。

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、混和材として国内炭のフライアッシュを用いた。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、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。なお、促進試験と自然暴露試験では用いたセメントおよびフライアッシュは全く同じものではないが、散水を行わない促進中性化試験から屋内自然暴露試験結果の予測について検討した研究 [1] においても、異なる材料を用いており、一応の比較は可能なものと考えられる。また、確認のため、促進試験と同じ材料を用いた供試体による自然暴露試験を現在実施中である。

表-1 モルタルの配合

C+F (kg/m ³)	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	W (kg/m ³)	S/(C+F)	flow (mm)
648.6	45	0	291.7	2.03	173
	45	30	291.7	1.94	196
573.6	55	0	315.5	2.30	214
	55	30	315.5	2.20	241
514.2	65	0	334.2	2.57	241
	65	30	334.2	2.46	269

*1 新潟大学助手 工学部建設学科、工修（正会員）

*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

2.2 配合

モルタルの配合は水セメント比を45、55、65%の3種類、それぞれの水セメント比に対してフライアッシュの置換率を0、30%の2種類とする計6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。なお、フライアッシュ混和の場合にはフライアッシュとセメントの比重の違いにより、骨材量が若干異なる。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/m³の3種類、それぞれの単位結合材量に対してフライアッシュの置換率を0、30%の2種類とする計6種類とし、スランプ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

C+F (kg/m ³)	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	slump (cm)
330	46.2	0	152	39	4.8
	42.8	30	141	38	4.4
290	52.5	0	151	40	5.3
	47.7	30	139	39	5.0
250	60.8	0	152	42	5.0
	56.4	30	141	41	4.5

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1、7、28および91日間の4種類である。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、促進1、3、5、および9週目で供試体を軸方向端部から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等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。中性化深さの測定は、暴露2、5、10および15年目に行った。

3. 実験結果と考察

3.1 配合条件および初期養生条件が中性化速度に及ぼす影響

中性化深さの経時変化は暴露期間もしくは促進期間の平方根に比例するとされているが、本研究で行った、自然暴露試験および2種類の促進中性化試験においても同様の傾向であった。従っ

て、以後は中性化速度を中性化係数（中性化深さの促進期間の平方根に対する比）を用いて評価することとする。

図-1 および図-2 に自然暴露試験および促進試験における、水結合材比と中性化係数の関係を示す。図より、水結合材比が大きくなるに従い、中性化係数も大きくなっている。また、フライアッシュを混和したものは無混和に比べて中性化係数が大きくなっている。これは、フライアッシュを混和することにより、初期強度が低下すること、ポゾラン反応によって水酸化カルシウムが消費されることが原因として考えられる[1]。自然暴露試験においては水分の供給の有無によらず、フライアッシュ混和と無混和との中性化係数の差は、水結合材比によらずほぼ同じとなっているが、通常の促進試験ではフライアッシュ混和で水結合材比が大きい場合に散水促進試験と比較して、中性化係数が非常に大きくなっている。

図-3 および図-4 に自然暴露試験および促進試験における、初期養生期間と中性化係数の関係を示す。図より、自然暴露試験、促進試験ともに初期養生期間の影響は水分の供給がある場合の方が小さくなっており、フライアッシュ無混和では7日以上、混和の場合は28日以上初期養生で中性化係数がほぼ一定となっている。これに対して、水分供給の無い場合には、初期養生期間が短いと

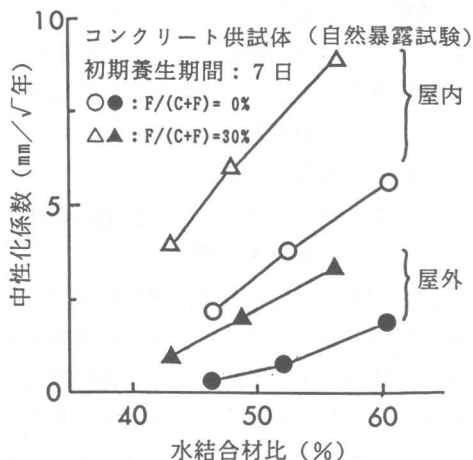


図-1 水結合材比と中性化係数の関係

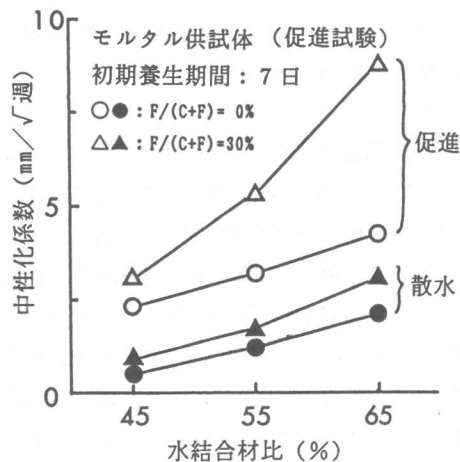


図-2 水結合材比と中性化係数の関係

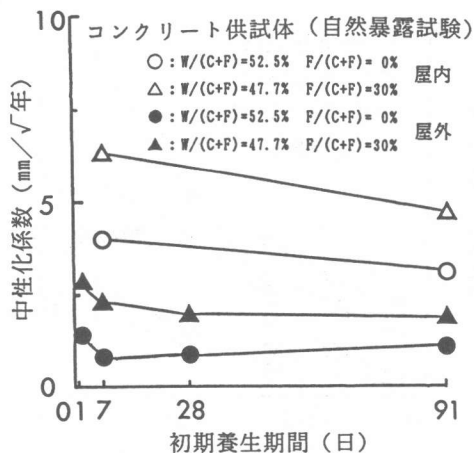


図-3 初期養生期間と中性化係数の関係

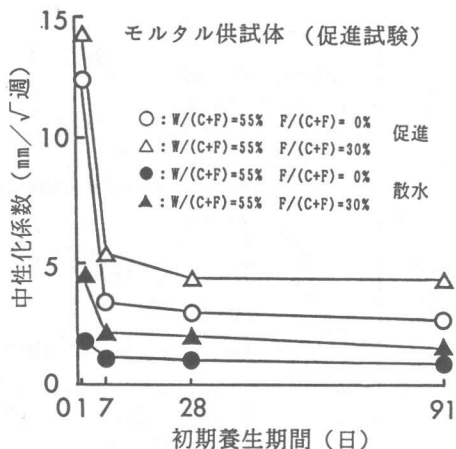


図-4 初期養生期間と中性化係数の関係

中性化係数が非常に大きくなる傾向がみられる。従って、屋外自然暴露試験における配合条件や初期養生条件が中性化速度に及ぼす影響を評価するには、通常の促進試験より散水促進試験の方が適していると考えられる。

3. 2 フライアッシュの混和が中性化速度に及ぼす影響

図-5および図-6に自然暴露試験および促進試験における、フライアッシュの置換率と中性化係数の関係を示す。図より、自然暴露試験、促進試験ともにフライアッシュを混和することにより中性化係数が大きくなっている。また、水分の供給がある場合の方が無い場合よりフライアッシュ混和の影響が小さくなっている。

図-7および図-8に自然暴露試験および促進試験における、水セメント比（フライアッシュ混和の場合には、フライアッシュを除いて計算）と中性化係数の関係を示す。フライアッシュが中性化速度の低減に全く貢献していなければ、水セメント比と中性化係数の関係は無混和のものと同様になるが、同一水セメント比の場合、通常の促進試験の7日養生の場合を除きフライアッシュを混和したものは無混和より中性化係数が小さくなっている。しかし、図-1および図-2に示すように、同一水結合材比で比較するとフライアッシュ混和の方が中性化係数が大きくなっている。従っ

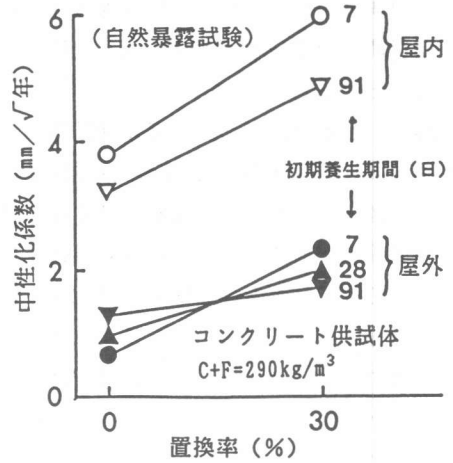


図-5 フライアッシュの置換率と中性化係数の関係

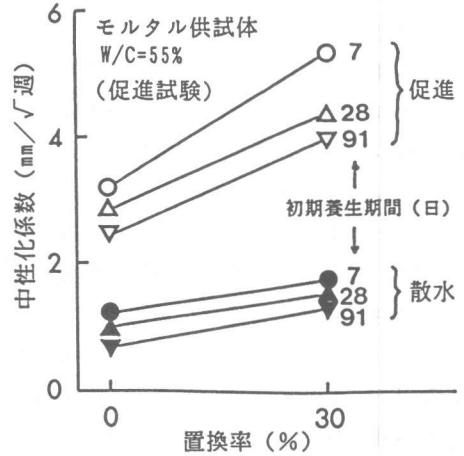


図-6 フライアッシュの置換率と中性化係数の関係

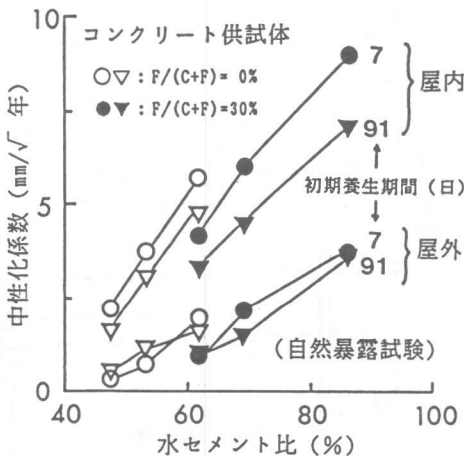


図-7 水セメント比と中性化係数の関係

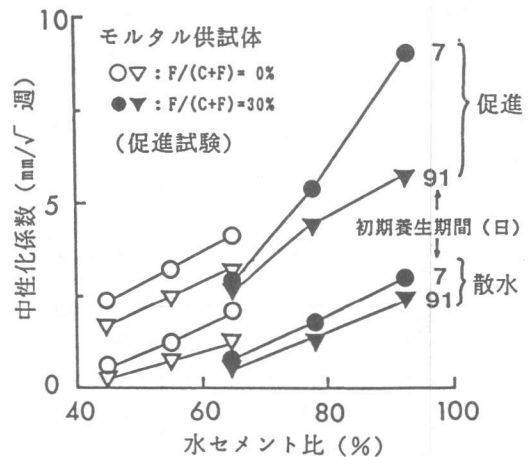


図-8 水セメント比と中性化係数の関係

て、フライアッシュはセメントと同等ではないが、ある程度中性化速度の低減に貢献していると考えられる。そこで、同じ中性化条件における初期養生期間91日でフライアッシュ無混和の供試体の水セメント比と中性化係数の関係を基準として、フライアッシュの中性化速度低減に対する貢献度を評価することとした。具体的には、中性化係数が同じであれば基準とした供試体と水結合材比が同じになると仮定して換算水結合材比、 $W / (K_1 C + K_2 F)$ を求め、 K_2 を算出した。ここで、 K_1 はセメントの中性化速度低減に対する貢献度で、初期養生期間が91日の場合は1となる。 K_2 はフライアッシュの中性化速度低減に対する貢献度である。図-9にそれぞれの試験における、初期養生期間とフライアッシュの貢献度 K_2 の関係を示す。図より、初期養生期間が長いほど K_2 の値が大きくなっており、フライアッシュ混和の場合の初期養生の重要性を確認できる[1]。また、水分供給のある屋外暴露試験および散水促進試験の方が、水分供給の無い屋内暴露試験および通常の促進試験に比べて、 K_2 の値が大きくなっている。これは、水分の供給により、初期養生以降もポゾラン反応が継続し、組織の緻密化により中性化が抑制されたためと考えられる。 K_2 の値は屋外暴露試験と散水促進試験でほぼ同じとなっており、フライアッシュの混和の影響の面からみても、屋外自然暴露試験結果の評価には散水促進試験の方が適していると考えられる。また、通常の促進試験で初期養生期間が7日の場合には、フライアッシュが中性化速度の低減にほとんど貢献していない。これは、ポゾラン反応が十分に進行しないうちに、乾燥状態におかれ、中性化が進行したためと考えられる。従って、初期養生期間が短い場合に通常の促進試験を行うと、中性化係数が大きくなり、フライアッシュの影響を過大に評価する可能性があるものと考えられる。

3.3 中性化深さの予測

促進試験の結果から自然状態でのコンクリートの中性化深さを予測するには、促進試験の一週間が自然暴露試験の何週間に相当するかがわかれば良いが、これは同一圧縮強度における中性化係数の比から求めることができる[2]。中性化係数は初期養生直後の圧縮強度と高い相関があることが知られているが、本研究においても次式により圧縮強度と中性化係数の関係を定式化した。

屋外暴露試験： $b = A + B \sqrt{f}$

散水促進試験： $b' = A' + B' \sqrt{f'}$

b, b' ：中性化係数

A, B, A', B' ：実験定数

f, f' ：初期養生直後の圧縮強度

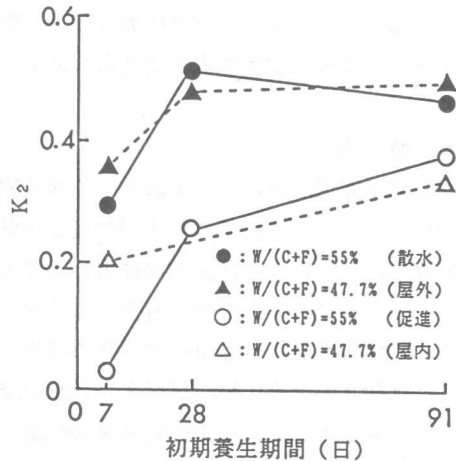


図-9 初期養生期間と K_2 の関係

表-3 中性化係数予測のための諸係数および促進倍率

初期養生期間(日)	フライアッシュ混和の有無	試験方法	A (A')	B (B')	A'/A	B'/B	促進倍率
7	無	屋外暴露	1.182	-0.069	4.69	4.32	2.0
		散水促進	5.546	-0.298			
	有	屋外暴露	1.238	-0.083	4.61	4.79	
		散水促進	5.705	-0.398			
28	無	屋外暴露	1.384	-0.065	3.64	3.37	1.2
		散水促進	5.036	-0.219			
	有	屋外暴露	1.261	-0.065	4.82	4.88	
		散水促進	6.079	-0.317			
91	無	屋外暴露	1.647	-0.069	4.22	4.36	1.8
		散水促進	6.958	-0.301			
	有	屋外暴露	1.639	-0.072	3.30	3.31	
		散水促進	5.401	-0.238			

コンクリートとモルタルでは供試体形状（コンクリート： $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 、モルタル： $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ ）や骨材の違いにより、二酸化炭素の浸入速度を左右する微細組織の状態が同じでも、強度が異なっていると考えられる。そこで、初期養生期間ごとに水結合材比とコンクリートの圧縮強度の関係式を求め、この式にモルタルの水結合材比を代入することにより、モルタルの強度をコンクリートの強度に換算して、係数 A' および B' を求めた。結果を表-3に示す。また、同一初期養生条件の場合には配合条件によらず、促進倍率は一定でなければならないが、その条件は、 $(A'/A) = (B'/B)$ である。表より、同じ初期養生期間では、 $(A'/A) = (B'/B)$ と見なせ、散水促進中性化試験から屋外自然暴露試験の結果を予測できるものと考えられる。促進倍率は $(b'/b)^2$ で与えられるが、表より、フライアッシュ無混和で初期養生期間28日の場合とフライアッシュ混和で初期養生期間91日の場合を除き、約20倍となっており、本研究で行った促進条件では、初期養生直後に同じ圧縮強度が得られているコンクリートについては屋外自然暴露の20倍程度の促進効果があるものと考えられる。しかし、本研究で比較の対象とした自然暴露供試体は降雨が遮られないように暴露されたものであり、実際の構造物では部位によって水分の供給状態が異なると考えられる。実際の構造物の中性化深さの予測に散水促進試験を適用するには、部位による水分の供給量および供給間隔の違いの把握とそれが中性化の進行に及ぼす影響を明らかにする必要があると考えられる。

4. 結 論

本研究は促進試験によって屋外に自然暴露され降雨の影響を受けるコンクリートの中性化深さを予測するため、配合条件および初期養生条件の異なるモルタル供試体を作製し、散水促進中性化試験を行い、自然暴露試験の結果と比較し検討を加えた。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) フライアッシュ混和の有無によらず、水分の供給は中性化の進行を抑制する。
- (2) 屋外自然暴露状態での中性化の進行に対する配合条件、初期養生条件の影響を評価するには通常の促進中性化試験より散水促進中性化試験の方が適している。
- (3) フライアッシュの中性化速度の低減に対する貢献度は、屋外自然暴露試験と散水促進中性化試験ではほぼ同じとなっており、フライアッシュ混和の影響の点からも、散水促進中性化試験は屋外自然暴露試験の評価に適している。
- (4) フライアッシュを混和した場合でも、散水促進中性化試験の結果から屋外自然暴露試験の結果を予測できる。本研究の促進条件の場合、屋外自然暴露試験に対する促進倍率はフライアッシュ混和の有無によらず約20倍である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、フライアッシュを提供していただいた株式会社電発コールテックに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 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、土木学会論文集、No. 390/V-8、pp. 225~233、1988. 2
- 2) 佐伯彦彦・長滝重義・大賀宏行・高見浩之：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、Vol. 13、No. 1、pp. 609~614、1991. 6