

## フライアッシュを混合したコンクリートの自然曝露 環境下における 中性化性状に関する研究

伊藤, 是清  
九州東海大学工学部

小山, 智幸  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

小山田, 英弘  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 | 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

船本, 憲治  
九州電力株式会社

他

<https://doi.org/10.15017/19101>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 12, pp.115-121, 2007-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン :  
権利関係 :

## フライアッシュを混合したコンクリートの自然曝露環境下における 中性化性状に関する研究

Carbonation of Concrete using Fly Ash by Long-term Exposure Test

伊藤是清\*<sup>1</sup>, 小山智幸\*<sup>2</sup>, 小山田英弘\*<sup>2</sup>, 船本憲治\*<sup>3</sup>, 松藤泰典\*<sup>4</sup>

Korekiyo ITO, Tomoyuki KOYAMA, Hidehiro KOYAMADA, Kenji FUNAMOTO  
and Yasunori MATSUFUJI

In this study, the long-term carbonation of concrete using fly ash was investigated by the outdoor and indoor exposure tests. The main conclusions are as follows.

- 1) It was confirmed that the carbonation resistance of concrete using fly ash with constant cement content increased as the fly ash content increased.
- 2) The coefficient of carbonation rate of concrete using fly ash with constant powder content could be expressed by the water-cement ratio.

**Keywords** : Fly Ash, Concrete, Large Quantity Use, Carbonation, Exposure Test

フライアッシュ, コンクリート, 大量使用, 中性化, 自然曝露試験

### 1. はじめに

フライアッシュの発生量は今後も増加するものと予想されており, その有効利用に関して多方面からの研究が行われている。筆者らは, フライアッシュをコンクリート用混和材として有効利用するために, フライアッシュを混合したコンクリートの諸性状についてこれまでに検討を行ってきた<sup>1), 2)</sup>。

コンクリートの諸性状のうち, 耐久性を考慮する上で, 中性化は最も一般的かつ重要な劣化要因である。中性化は, 本来, pHが12~13程度の強アルカリ性を呈しているコンクリートが, 空気中の二酸化炭素の作用により, コンクリートの表面から次第にpHが低下していく現象である。コンクリートのpH保持能力は, 水和反応によって生成した水酸化カルシウム量に依存するが, フライアッシュを混合したコンクリートでは, ポズラン反応により長期的に水酸化カルシウムが消費される。また, その一方で, 硬化体組織が緻密化される。前者は, 中性化を加速させる要因となり, 後者は

中性化を抑制する要因となる。したがって, この両者の影響の大小でフライアッシュを混合した場合の中性化性状は決定される。

ところで, 中性化性状の評価は, 比較的短時間で評価が可能な促進試験によって一般的に行われており, フライアッシュを混合したコンクリートについても多くの研究成果が報告されている。ただし, 先にも述べたように, フライアッシュを混合した場合には, 長期的にポズラン反応を生じるため, フライアッシュの混合の影響は, 短時間で得られる促進試験結果と通常的环境下に長期間自然曝露した場合の結果で異なる場合もあることが報告されている<sup>3)</sup>。また, 筆者らがこれまでに検討しているようなフライアッシュを大量混合したコンクリートの長期中性化性状に関しては必ずしも明らかになっていない。したがって, 自然環境下における長期中性化性状の把握は, フライアッシュを混合したコンクリートにおいては特に重要であるといえる。

本研究は, フライアッシュをセメントに対し内割および外割で大量混合したコンクリート試験体を, 屋内および屋外に9年間自然曝露した場合の中性化試験結果と, 併せて促進中性化試験を行った結果について報告するものである。なお, 本研究で用いた曝露試験体

\*1 九州東海大学工学部

\*2 都市・建築学部門

\*3 九州電力

\*4 北九州市立大学国際環境工学部

は、日本建築学会フライアッシュコンクリート調査研究小委員会（1995.11～1999.3）の研究の一環として作成されたものである。

## 2. 実験概要

実験は、外割調合シリーズ（実験Ⅰ）と内割調合シリーズ（実験Ⅱ）の2種類である。以下に概要を示す。

### 2.1 調合および使用材料

実験に使用したフライアッシュの品質を表1に示す。実験Ⅰでは、JISⅡ種相当の分級細粉（F40）と、低品質灰の有効利用を目的として、JIS規格外の分級粗粉（F10）を用いた。実験Ⅱでは、比表面積が2930（F27）、3830（F40）および5060（F50） $\text{cm}^2/\text{g}$ の3種類を使用し、これらのうち、F27はJISⅣ種に、その他はJISⅡ種に相当するものである。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ）、細骨材は海砂（表乾密度 $2.58\text{g}/\text{cm}^3$ （実験Ⅰ）、 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ （実験Ⅱ））、粗骨材は安山岩碎石（表乾密度 $2.75\text{g}/\text{cm}^3$ ）、化学混和剤は高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）、AE減水剤およびフライアッシュ用AE剤を用いた。

調合表を表2および表3に示す。実験Ⅰの調合は、フライアッシュをセメントの外割で0、85、178、244、332、455、 $640\text{kg}/\text{m}^3$ 混合し、これらのうち、244、332、 $455\text{kg}/\text{m}^3$ については、粗粉フライアッシュのコンクリートへの有効利用を目的として、細粉単味の場合と、細粉と粗粉を質量比で6:4の割合で混合した場合につ

表1 フライアッシュの品質

種類		F10	F27	F40	F50
項目					
SiO <sub>2</sub> (%)		49.5	—	48.7	—
湿分(%)		0.1	0.1	0.1	0.1
強熱減量(%)		0.3	0.8	1.1	1.1
密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2.24	2.32	2.36	2.36
粉末度	45 $\mu$ ふるい残分(%)	88	—	9	—
	比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	970	2,930	3,830	5,060
フロー値比(%)		89	102	108	105
活性度指数(%)	28日	71	79	82	82
	91日	78	95	103	98
JIS A 6201		規格外	Ⅳ種	Ⅱ種	Ⅱ種

いて実施した。

実験Ⅱでは、水結合材比を40%および60%の2水準とし、セメントに対するフライアッシュの内割置換率を0、20および40%の3水準とした。ここで、置換率40%は、日本建築学会で規定されている置換率の上限値である30%<sup>4)</sup>を超えた大量混合を想定したものである。

### 2.2 実験概要

実験Ⅰの試験体は、材齢28日までの目標外気温度を35℃、20℃および5℃とし、材齢7日まで封緘養生を

表2 コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの性質（実験Ⅰ）

記号	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )						C+F,%		cm	%		
	W/B	W	C	F40	F10	S	G	AD1	AD2	スランブ° (スランブ°フロー)	空気量		
S0	65	185	285	0	—	841	974	0.50	—	18.5	4.5		
S1	50			85		747		0.10	—	19.5	1.3		
S2	40			178		646		0.20	—	20.0	1.3		
S3	35			244		575		0.35	—	19.5	1.2		
S4	30			332		477		0.55	—	18.0	1.8		
S5	25			455		343		0.85	—	19.0	2.2		
S6	20			640		0		1125	—	1.05	17.5	2.5	
S3B	35			146		98		568	974	0.35	—	19.0	1.6
S4B	30			199		133		472		0.50	—	19.5	2.5
S5B	25			273		182		333		0.75	—	20.5	2.7
H5	25	455	—	519	828	1.20	—	(61.5×64.5)	3.3				
H6	20	640		439	699	—	1.20	(67.5×70.0)	3.0				
H5B	25	273		182	497	776	1.00	—	(55.5×57.0)	4.3			

※W/B：水結合材比，W：水，C：セメント，F40・F10：フライアッシュ，S：細骨材，G：粗骨材，AD1・AD2：高性能AE減水剤

※調合記号Sシリーズ：練上がり時の目標スランブを $18\pm 2.5\text{cm}$ に設定，調合記号Hシリーズ：練上がり時の目標スランブフローを $60\pm 10\text{cm}$ に設定

表3 コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの性質（実験Ⅱ，外気温20℃の場合）

記号	（%）		（kg/m <sup>3</sup> ）							C+F,%		cm	%	
	W/B	F/B	W	C	F50	F40	F27	S	G	AD3	AD4	スランブ <sup>o</sup>	空気量	
1	40	0	180	450	—	—	—	702	998	0.25	0.01	19.0	4.2	
3		20	175	350	—	88	—	699		0.25	0.01	19.5	4.5	
5		40	170	255	—	170	—	—		—	0.25	0.01	20.0	3.9
7		20	185	370	93	—	—	—		653	0.20	0.01	19.5	4.4
8		40	180	270	180	—	—	—		—	0.20	0.01	20.5	4.3
2	60	0	180	300	—	—	—	840	982	0.25	0.01	20.0	4.0	
4		20	175	234	—	58	—	842		0.25	0.01	19.5	4.6	
6		40	165	165	—	110	—	868		0.25	0.01	19.0	5.0	
9		20	180	240	—	—	60	822		0.20	0.01	20.0	3.7	
10		40	180	180	—	—	120	803		0.20	0.01	20.5	3.8	

※W/B：水結合材比，F/B：フライアッシュ内割置換率，W：水，C：セメント，F50・F40・F27：フライアッシュ，S：細骨材，G：粗骨材，AD3：AE減水剤，AD4：フライアッシュ用AE剤

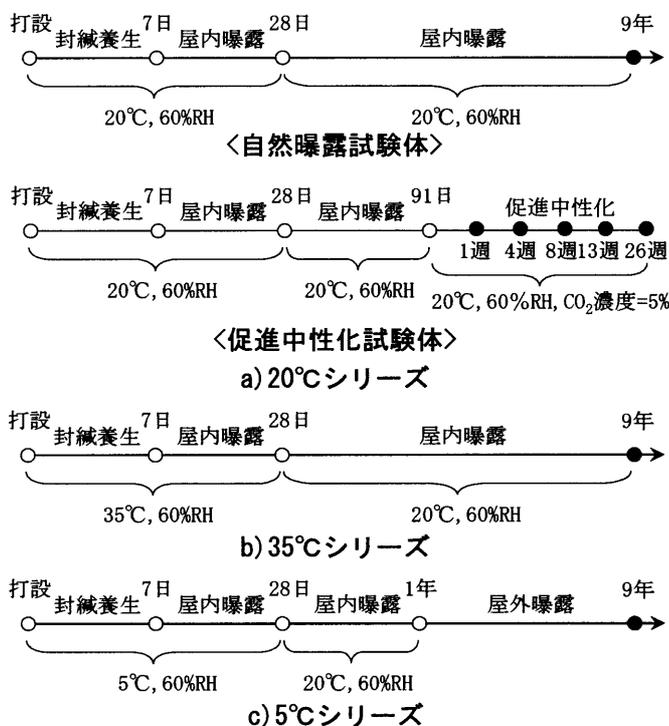


図1 養生方法（実験Ⅰ）（●：中性化試験実施材齢）

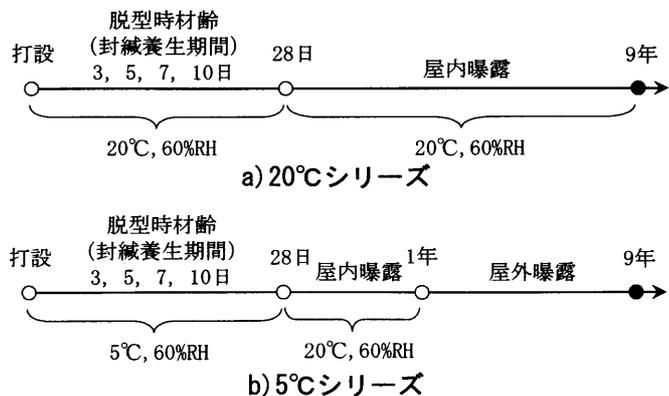


図2 養生方法（実験Ⅱ）（●：中性化試験実施材齢）

行った。その後、20℃シリーズは、20℃、相対湿度60%、炭酸ガス濃度5%による促進中性化試験（促進材齢1，4，8，13および26週）および20℃、相対湿度60%における屋内曝露試験に、また、35℃シリーズは屋内曝露試験に、5℃シリーズは材齢1年において屋外曝露試験に供した。

実験Ⅱでは、コンクリート打設から28日までの目標外気温を20，5℃の2水準で一定とし、脱型時材齢が中性化性状に及ぼす影響を検討するために、封緘養生を3，5，7，10日の4水準で行った。その後28日以降は、20℃シリーズは屋内曝露試験に、5℃シリーズは屋外曝露試験に供した。自然曝露試験の環境条件および自然曝露開始材齢は実験Ⅰと同様である。試験体形状は10×10×40cmで、打設上下面および端面をエポキシでシールしたものであり、両側面からの中性化深さを所定の材齢で測定した。

実験Ⅰおよび実験Ⅱにおける養生方法の詳細を図示したものを図1および図2に示す。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フライアッシュの外割混合が中性化速度係数に及ぼす影響（実験Ⅰ）

##### 3.1.1 促進中性化試験結果

実験Ⅰで行った促進中性化試験の結果を図3に示す。なお、図中の中性化速度係数は、促進材齢1，4，8，13および26週において測定した中性化深さと材齢の平方根との関係に対して以下の式(1)を当てはめた際に得られた回帰式の傾きとした。

$$C = A\sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、

C : 中性化深さ (mm)  
 A : 中性化速度係数 (mm/√年)  
 t : 促進期間 (年)

同図からも明らかなように、中性化速度係数はフライアッシュの外割混合量の増加に伴って減少していることがわかる。また、JIS規格外である粗粉をJIS II種相当の細粉に質量比で40%混合したものにおいても、細粉単味の場合と同程度の中性化抑制効果が期待でき、さらに、後出する自然曝露試験結果(図4参照)においても同様の傾向が得られている。また、既報<sup>1)</sup>で示しているが、圧縮強度についても同様の結果が得られていることから、強度および中性化の面から外割混合による粗粉フライアッシュの有効利用が可能であ

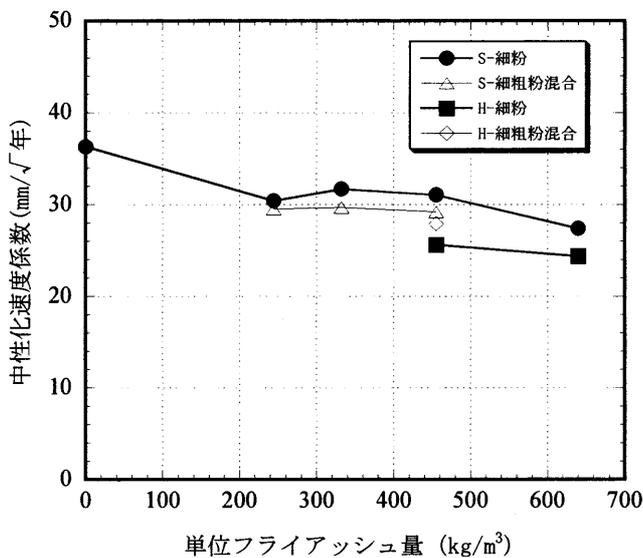


図3 フライアッシュの外割混合量と中性化速度係数の関係(促進試験)

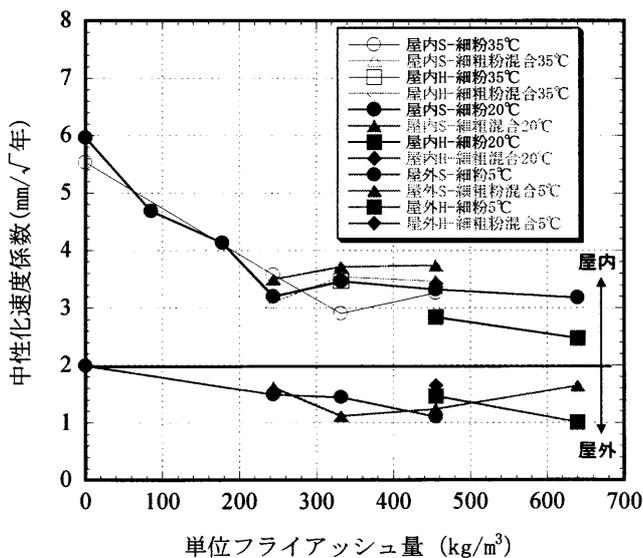


図4 フライアッシュの外割混合量と中性化速度係数の関係(自然曝露試験)

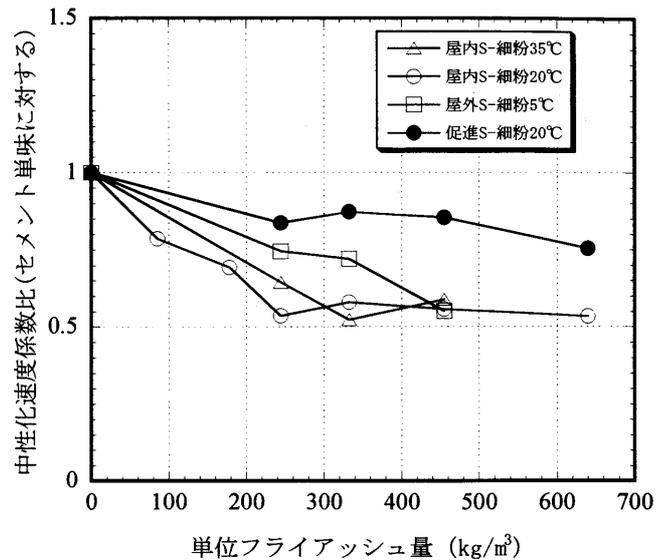


図5 中性化の抑制効果に及ぼす試験環境の影響

ることが確認でき、低品質フライアッシュの有効利用を拡大する上での有益な知見が得られた。

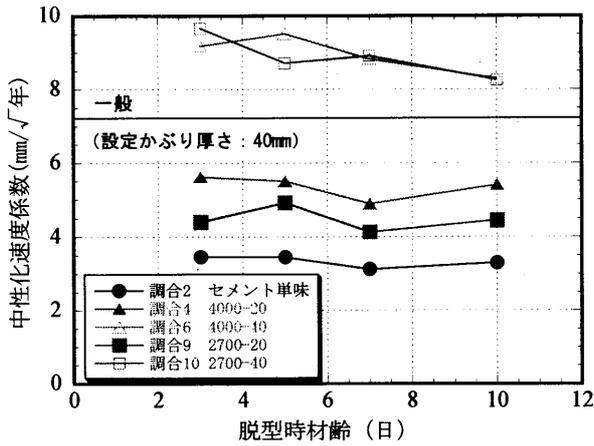
### 3.1.2 自然曝露試験結果

自然曝露試験結果を図4に示す。これら自然曝露試験結果においても、フライアッシュの混合量の増加に伴い中性化速度係数が減少するなど、促進試験と同様の結果が得られた。

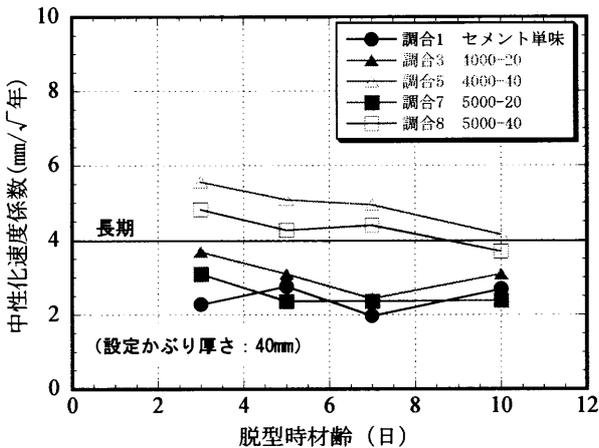
次に、屋内曝露試験の結果から、材齢28日までの養生温度(20°Cおよび35°C)の影響をみると、今回行った実験の範囲では両者に明確な違いは認められなかった。一方、フライアッシュを内割で使用した場合に、施工時期の違いが中性化性状に及ぼす影響について検討した結果<sup>5)</sup>によると、一般期よりも暑中期に打設したもののほうが中性化深さは大きくなると報告されている。フライアッシュを外割混合した硬化体は、所定の品質を得るために必要な単位セメント量を確保した上でフライアッシュを混合しているため、内割調合の場合と比較してフライアッシュの品質や養生条件などの影響を受けにくいことが推察される。

次に、養生温度の違いはあるが、屋内試験の結果と屋外曝露試験の結果を比較すると、通常いわれているように、屋内よりも屋外に自然曝露したものの方が中性化速度係数は小さくなった。

図5には、促進試験および自然曝露試験において、それぞれのセメント単味コンクリートの中性化速度係数に対する中性化速度係数比と単位フライアッシュ量の関係を示している。同図より、試験環境の違いによりセメント単味コンクリートに対する中性化速度係数の低下の割合が異なることがわかる。すなわち、促進試験の結果は、自然曝露試験の結果よりもフライアッシュの混合による中性化速度係数の低下割合を過小評

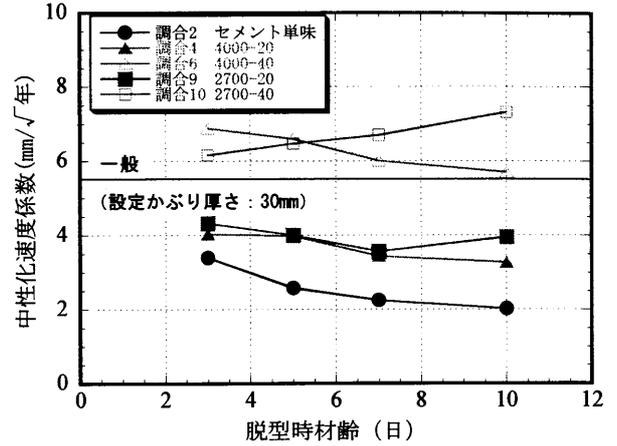


a) 水結合材比 60%, 計画供用期間：一般

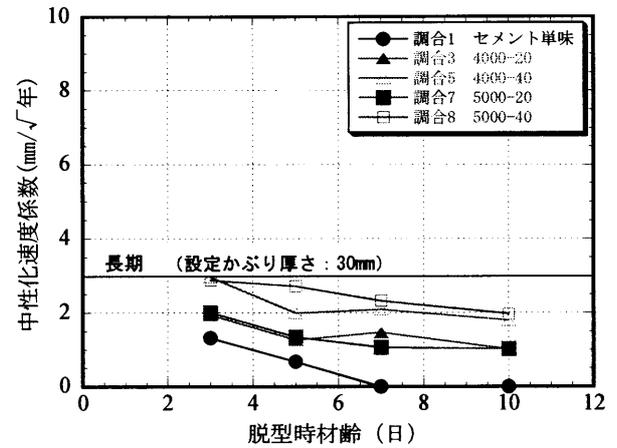


b) 水結合材比 40%, 計画供用期間：長期

図6 脱型時材齢が中性化速度係数に及ぼす影響 (屋内曝露シリーズ)



a) 水結合材比 60%, 計画供用期間：一般



b) 水結合材比 40%, 計画供用期間：長期

図7 脱型時材齢が中性化速度係数に及ぼす影響 (屋外曝露シリーズ)

表4 分散分析結果

調査	W/B(%)	分散比 F	
		屋内	屋外
1	40	10.27**	900.64**
3		15.17**	67.08**
5		15.64**	54.12**
7		6.60**	44.31**
8		17.82**	50.68**
2	60	0.68**	15.19**
4		3.99**	9.70**
6		9.04**	8.46**
9		5.31**	1.93**
10		3.53**	2.81**

\*危険率 5%で有意, \*\*危険率 1%で有意

価していることがわかる。この結果は、促進試験と自然曝露試験では、中性化の進行プロセスが必ずしも一致していないこと示唆するものである。促進試験から自然環境下における中性化性状を評価する際には安全

側であるために問題ないと思われるが、機構の解明などの検討を行う場合はこのような結果が生じることも考慮する必要があると考えられる。

### 3.2 フライアッシュの内割混合が中性化速度係数に及ぼす影響 (実験Ⅱ)

#### 3.2.1 脱型時材齢および水結合材比が中性化速度係数に及ぼす影響

脱型時材齢が中性化速度係数に及ぼす影響を図6および図7に示す。これらのうち、図6は屋内曝露試験の結果を、図7は屋外曝露試験の結果を示している。その結果、多少のばらつきはあるものの、脱型時材齢が長くなるほど中性化速度は減少する傾向にある。表4には、脱型時材齢毎に一元配置による分散分析を行った結果を示しているが、大半が危険率 1%で有意であり、脱型時材齢が中性化速度係数に大きく影響していることがわかる。また、水粉体比別では 40%の方が、屋内よりも屋外の方が脱型時材齢の影響を大きく受けることがわかる。

文献6)では、耐久性を確保するため、ポルトランド

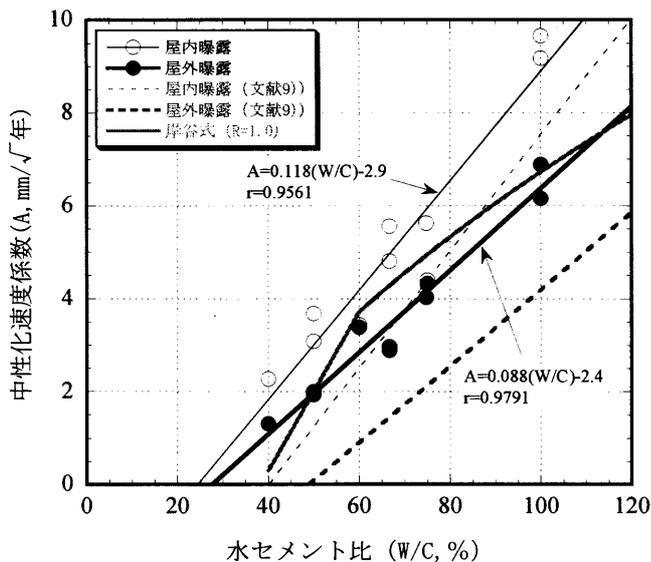


図8 水セメント比と中性化速度係数の関係（脱型3日）

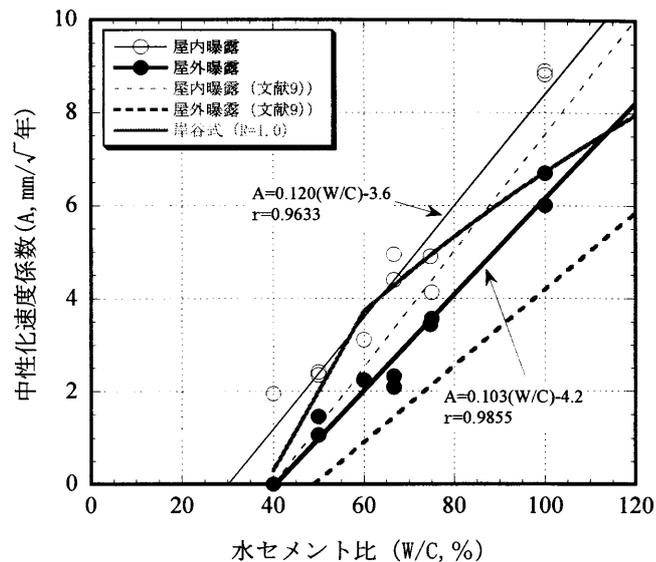


図10 水セメント比と中性化速度係数の関係（脱型7日）

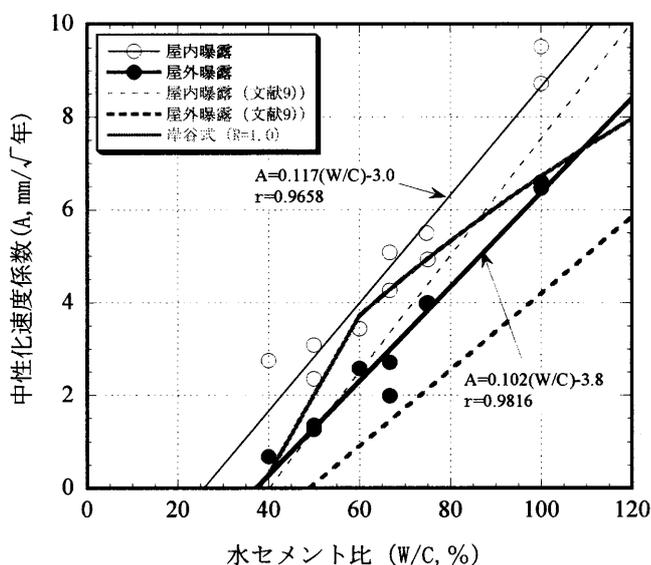


図9 水セメント比と中性化速度係数の関係（脱型5日）

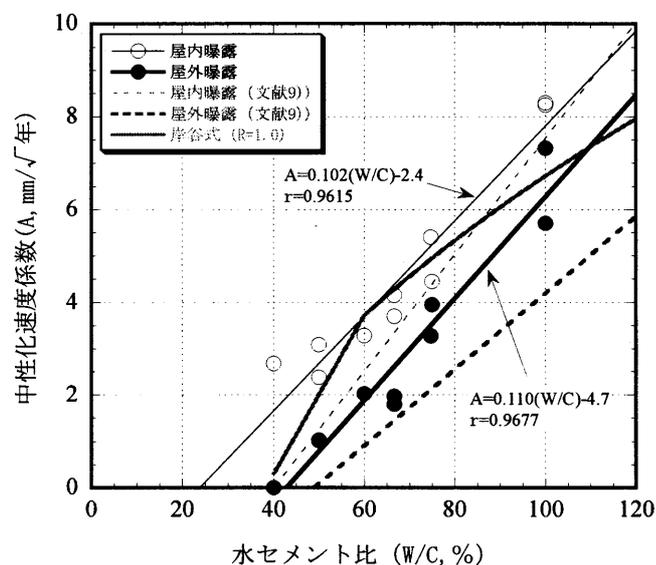


図11 水セメント比と中性化速度係数の関係（脱型10日）

セメントの一部をフライアッシュに置換率 20%以下の範囲で置換する場合の水結合材比の最大値として、計画供用期間<sup>7)</sup>の級別に、一般 60%、標準 50%および長期 45%が提案されている。また、JASS5では、フライアッシュセメント B 種の水セメント比の最大値として 60%が規定されている。そこで、ここでは、フライアッシュを混合したコンクリートにおける屋内および屋外での 9 年間の自然曝露試験結果を踏まえ、計画供用期間の級毎に要求される水結合材比の最大値に関して検討を行った。図 6 および図 7 には、JASS5 における各計画供用期間の級（一般および長期）で要求される中性化速度係数を併記した。なお、屋内で鉄筋が腐食状態になるのは最小かぶり厚さから 20mm 奥まで中性化が進行した時（40mm）とし<sup>8)</sup>、屋外で鉄筋が腐食

状態になるのは JASS5 に規定されている最小かぶり厚さまで中性化が進行した時（30mm）とした。各計画供用期間の級で要求される中性化速度係数と本実験で得られた実測値を比較すると、実測値は要求値をほぼ満足しており、本実験の結果からも、文献 6) で提案されている置換率 20%以下の範囲におけるフライアッシュを内割混合したコンクリートの水結合材比の最大値である一般 60%・長期 45%はほぼ妥当な値であると判断される。

### 3.2.2 水セメント比と中性化速度係数の関係

既往の文献では、フライアッシュを内割混合したコンクリートの中性化速度係数は水セメント比で評価が可能とされている<sup>9)</sup>。そこで、水セメント比と中性化速度係数の関係を脱型時材齢毎に図 8～図 11 に示す。

なお、図中には、既往の文献の結果<sup>9),10)</sup>も併記した。

これらの図より、既往の研究と同様に、本実験においても両者の関係には強い相関が認められ、置換率、水結合材比およびフライアッシュの種類にかかわらず、フライアッシュを内割混合した場合には中性化速度係数は水セメント比で評価できることがわかる。また、本実験で得られた中性化速度係数は、文献9)より大きい値であったが、屋外曝露では安全側の評価式と言われる岸谷式 ( $R=1.0$ )<sup>10)</sup>よりは小さく、ほぼ妥当な結果となった。

このように、今回行ったような常識的な内割置換率や水結合材比の範囲であれば、中性化速度係数は水セメント比で評価が可能であるが、外割調合のように同一水セメント比でフライアッシュを内割調合よりも大幅に大量混合した場合には、図4でも示したように水セメント比のみでの中性化速度係数の評価は不可能である。今後は更に検討を加え、フライアッシュの調合方法によらない中性化の評価方法を検討していく予定である。

#### 4. まとめ

本研究の成果をまとめると以下の通りである。

- 1)フライアッシュを外割混合した場合、促進試験ならびに自然曝露試験においても、単位フライアッシュ混合量の増加に伴い中性化速度係数は減少することが確認できた。ただし、フライアッシュの中性化低減への寄与率は、促進試験と自然曝露試験では異なっており、自然曝露試験の方が大きくなった。
- 2)フライアッシュを内割混合した場合には、中性化速度係数に及ぼす脱型時材齢の影響は大きく、屋内曝露よりも屋外曝露の方が顕著であった。
- 3)フライアッシュを内割混合した場合、置換率、水結合材比およびフライアッシュの種類にかかわらず中性化速度係数は水セメント比で評価が可能である。
- 4)フライアッシュを内割混合した場合、計画供用期間の級（一般・長期）毎に要求される水結合材比の最大値として、フライアッシュ置換率20%以下の範囲では、一般60%・長期45%はほぼ妥当な値であることが確認できた。

#### 〈謝辞〉

本研究の遂行に際し、元九州大学技術職員津賀山健次氏にご協力を頂いた。なお、本研究の一部は九州大学21世紀COEプログラム「循環型住空間システムの構築」によった。末尾ながらここに謝意を表す。

#### 〈参考文献〉

- 1)松藤泰典他：石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究，コンクリート工学論文集，第12巻，第2号，pp.51-60，2001.
- 2)松藤泰典他：フライアッシュを内割使用したコンクリートの初期性状，日本建築学会九州支部研究報告，第37号，pp.53-56，1998.3.
- 3)佐伯竜彦他：散水促進中性化試験による中性化深さの予測，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.801-806，1993.
- 4)日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針（案）・同解説
- 5)船本憲治他：フライアッシュを内割使用したコンクリートの暑中環境下における諸性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，pp.1-6，2000.
- 6)日本建築学会材料施工委員会 RC 工事運営委員会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工ガイドライン，2005.
- 7)日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS5，鉄筋コンクリート工事，2003.
- 8)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針(案)・同解説，2004.3.
- 9)平原武他：フライアッシュコンクリートの長期性状に関する材齢10年の実験報告，その2 中性化，日本建築学会関東支部研究報告，2007.3.
- 10)長谷川拓哉他：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.665-670，2006.

(受理：平成19年6月7日)