

# 論文 石炭灰を多量に混用したコンクリートの中性化

狩野敏也\*1・曾根徳明\*2・谷川公一\*3

**要旨:** 本研究は、石炭灰（原粉）を多量混用したコンクリートについて、その中性化特性について調べたものである。その結果、屋内および屋外に暴露したCAコンクリートは、同一W/CのCA無混入のコンクリートよりも耐中性化特性が高くなること、また、中性化に対しては水セメント比と密接な関係にあることを明らかにした。

**キーワード:** 石炭灰、中性化、中性化深さ、中性化速度係数、水セメント比

## 1. はじめに

近年、我が国では、電力需要の増大に伴い、石炭火力発電所への依存度が増加する傾向にある。そのため、石炭火力発電所の新設・増設も進められており、これに伴い石炭灰（Coal Ash）の発生量が増大することも予想される。他方、セメント・コンクリート分野では、石炭灰を分級処理した「フライアッシュ」がセメント混合材、コンクリート混和材として利用されているが、その使用割合は発生量の10数% [1] であり、約40%は埋立処分されているのが現状 [2] である。

したがって、処分場の逼迫による環境問題、リサイクル資源の有効活用の観点から、石炭灰の多量有効活用が急務となっている。

以上のような背景を考慮し、著者らは、未処理の石炭灰、いわゆる原粉を多量に混用したコンクリート（以下、CAコンクリート）の諸特性について研究を進めてきた [3]。本報告は、CAコンクリートの中性化特性を、配合、養生条件と関連付けて考察したものである。

## 2. 試験概要

### 2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

表-1~3に、それぞれ使用材料、石炭灰（CA）の品質、コンクリートの配合を示す。

コンクリートの配合条件は、スランプ $18 \pm 2$  cm、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とし、単位水量、細骨材率を決定した。CA無混入のコンクリートは、 $C=350, 300, 250(\text{kg}/\text{m}^3)$ の3配合とした。一方、CAコンクリートは、CA無混入のコンクリートと同一単位水量とし、セメントとCAとの容積（粉体容積）を150, 175, 200, 225( $1/\text{m}^3$ )の4水準、各粉体量につき $C=300, 250, 200(\text{kg}/\text{m}^3)$ の3水準、計12配合とした。なお、CA無混入のコンクリートにはAE減水剤を、CAコンクリートには高性能AE減水剤を使用した。

### 2. 2 試験方法

\*1 秩父小野田（株）中央研究所 開発第2グループ（正会員）

\*2 秩父小野田（株）中央研究所 開発第2グループ、工博（正会員）

\*3 （株）小野田テクノ（正会員）

表-1 コンクリートに使用した材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 比重3.16
細骨材	静岡県小笠郡浜岡町産陸砂 表乾比重2.59, 吸水率1.5%
粗骨材	茨城県西茨城郡岩瀬碎石2005 表乾比重2.60, 吸水率0.8%
混和剤	AE減水剤 ポリアクリン酸系高性能AE減水剤
石炭灰 (CA)	火力発電所の電気集塵機で捕捉され、粒度調整等の処理をしていないもの（原粉）

表-2 石炭灰の性質

比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	メソポル- 吸着量 (mg/g)	B E T 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	化学成分 (%)		
				ig. loss	SiO <sub>2</sub>	CaO
2.16	3130	0.47	1.87	2.5	50.6	1.5

表-3 コンクリートの配合

種別	C+CA (l/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	CA/C (%)	W/(C+ CA) (%)	CA/(C+ CA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							W	C	CA	S	G	混和剤* <sup>1</sup>
CA 無混入	-	50.3	0	50.3	0	47.0	176	350	0	811	932	0.86
		58.7		58.7		859		930		0.75		
		70.4		70.4		879		952		0.63		
CA コンクリート	150	58.7	39.7	42.0	28.4	39.5	176	300	119	643	1005	2.10
		70.4	61.2	43.7	38.0			250	153		2.42	
		88.0	93.5	45.5	48.3			200	187		2.32	
	175	58.7	57.7	37.2	36.6	36.0	176	300	173	563	1021	3.78
		70.4	82.8	38.5	45.3			250	207		3.97	
		88.0	121	39.9	54.6			200	241		3.75	
	200	58.7	75.7	33.4	43.1	33.0	176	300	227	495	1024	5.53
		70.4	104	34.4	51.1			250	261		5.37	
		88.0	148	35.6	59.6			200	295		5.20	
	225	58.7	93.7	30.3	48.4	31.0	176	300	281	445	1009	6.97
		70.4	126	31.2	55.8			250	315		7.63	
		88.0	175	32.1	63.6			200	349		7.80	

\*<sup>1</sup>混和剤は、CA無混入がAE減水剤、CAコンクリートが高性能AE減水剤の添加量である。

中性化の試験は、10×10×40cmの角柱供試体を使用し、材齢7日および28日まで水中養生したのち暴露を開始した。暴露条件は、促進（温度20℃、湿度50%、CO<sub>2</sub>濃度15%：CAの効果を明確にするため、および試験期間短縮の観点から、通常の促進試験よりも高濃度に設定）、屋内暴露（温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室）および屋外暴露（日陰ができない場所：屋上に供試体を鉛直に静置）の3種類とした。中性化深さの測定は、促進試験は暴露開始後3, 7, 14, 28日、屋内および屋外試験は、暴露開始後91日, 1, 2, 5, 10年（現在材齢1年まで判明）とした。

測定方法は、供試体の長軸に対してほぼ直角となるよう所定材齢で割裂し、フェノールフタレイン1%エタノール溶液を割裂断面に噴霧して、赤変しない部分の深さを、

表-4 フレッシュコンクリートの性状及び圧縮強度試験結果

種別	粉体容積 (l/m <sup>3</sup> )	セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ° (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
					3日	7日	28日	91日	6ヶ月
CA 無混入	-	350	18.5	5.3	19.6	27.4	38.1	44.2	-
		300	19.5	4.6	13.5	19.5	30.4	35.2	-
		250	18.5	4.0	10.2	15.5	26.9	28.5	-
CA コンクリート	150	300	19.0	4.9	17.5	27.5	37.9	52.2	55.3
		250	18.0	6.0	13.5	20.6	31.5	40.8	45.6
		200	17.0	5.0	8.63	14.8	23.8	33.9	38.7
	175	300	18.0	5.3	19.9	30.2	42.1	55.4	59.8
		250	17.5	5.4	15.8	23.1	35.3	47.0	55.9
		200	18.0	5.0	10.6	17.4	27.2	37.6	45.9
	200	300	17.5	4.0	21.6	33.5	48.2	65.1	74.5
		250	17.5	4.0	17.5	25.9	40.1	53.7	61.8
		200	16.5	4.4	11.5	19.4	30.4	41.6	49.2
225	300	18.0	3.9	24.4	37.9	52.3	69.6	76.8	
	250	18.5	4.7	19.2	28.9	45.1	58.5	67.0	
	200	19.5	5.8	12.4	21.9	34.3	46.0	55.9	

各四辺を10等分して隅角部を除いた位置で測定し、それらの平均を中性化深さとした。

また、水中養生を行った円柱供試体の圧縮強度を、材齢3, 7, 28, 91日, 6ヶ月(CA無混入のものは材齢91日まで)で測定した。表-4に、フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の試験結果を示す。

### 3. 試験結果

#### 3.1 石炭灰の混入が中性化深さに及ぼす影響

図-1に促進暴露28日後の、CA/C(重量%)と中性化深さの関係を、図-2および図-3には、それぞれ屋内および屋外に暴露した場合の1年後の結果を示す。

図-1の促進暴露の結果によれば、水中養生7日のCAコンクリートの中性化深さは、同一W/CのCA無混入のコンクリートと比較して、一部を除いて同等か大きい。それに対して、水中養生28日の場合にはCAコンクリートの方が中性化深さが小さくなり、さらにCA混入率の増加に伴う中性化低減効果の増大も確かめられた。これらのことから、本促進試験のようにCO<sub>2</sub>濃度が15%と高い場合は、供試体の養生期間が異なると、同一W/CのコンクリートであってもCA混入の有無によって、耐中性化特性の評価が逆転する場合があることが確かめられた。

一方、図-2の屋内暴露の場合には、水中養生7日、28日いずれにおいても、同一W/CのCA無混入のコンクリートと比較して、CAコンクリートの中性化深さの方が小さくなっている。ただし、W/C=70.4, 58.7%の場合には、CA混入率の増加に伴う中性化深さの変化は、わずかである。したがって、CA混入による中性化深さの低減量について、単純にW/Cごとの平均を求めると、W/C=70.4, 58.7%の場合には、それぞれ約1.6mm, 約0.9mmとなった。

また、水中養生期間の相違に伴う中性化深さの差異は、W/Cごとに大略ほぼ一定であり、これは、比較的CO<sub>2</sub>濃度が低いこと、および環境条件が安定していることに起因しているものと推察される。すなわち、水中養生を7日から28日に増大させれば、中性化深さは、W/C=58.7, 70.4, 88.0%の場合にそれぞれ、1mm, 1.3mm, 2.3mm程度低減され、水中養生期間の延長が中

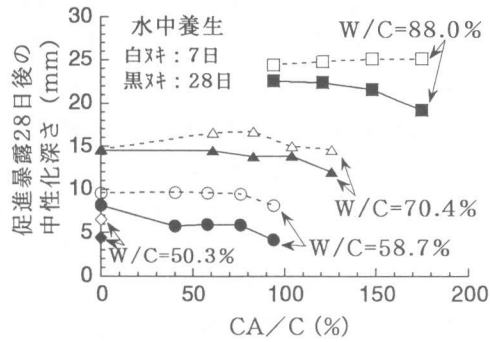


図-1 CA/Cと中性化深さの関係(促進暴露)

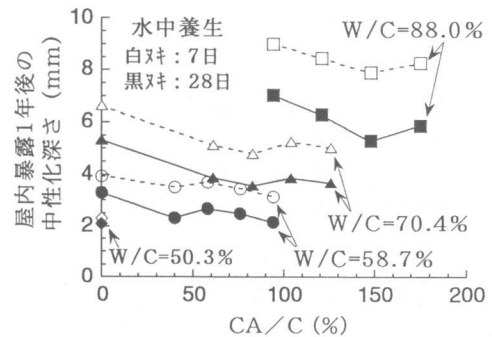


図-2 CA/Cと中性化深さの関係(屋内暴露)

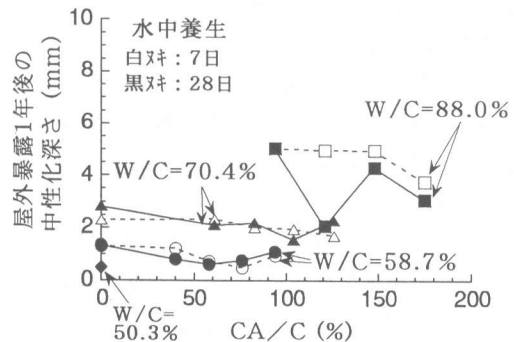


図-3 CA/Cと中性化深さの関係(屋外暴露)

性化深さ低減に及ぼす影響は、W/Cが大きいほど増大することも判明した。

図-3に示す屋外暴露の場合は、同一W/Cで比較すれば屋内の場合と同様に、CAコンクリートはCA無混入のものよりも中性化深さは小さくなっている。しかし、両者の差異は、測定値自体が小さいこともあいまって、1mm以内である。

なお、屋外暴露の場合、W/C=88.0を除くと、水中養生期間の違いが中性化深さに及ぼす影響は明確には認められない。これは、暴露開始以後の雨水等による水分供給、温度、湿度などの諸環境条件の相違が、CA混入の有無、および水中養生期間の相違よりも、コンクリートの中性化特性に多大の影響を及ぼしたことに起因すると推察される。

### 3.2 $\sqrt{t}$ 則に関する検討

図-4~6に、 $\sqrt{t}$  則への適合性について考察するため、それぞれ促進暴露後28日、屋内および屋外暴露後1年までに得られた中性化深さを、暴露期間の平方根でプロットしたものを示す。なお、ここには、セメント量に対して石炭灰が最も多く混入されている配合について検討するために、粉体量225(1/m<sup>3</sup>)の結果を例示した。

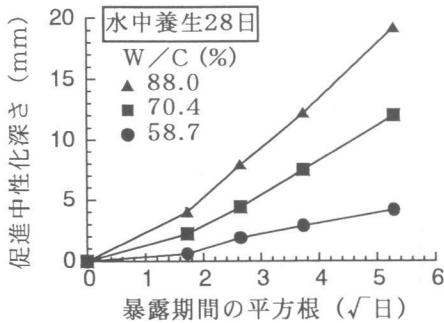


図-4 暴露期間の平方根と促進中性化深さの関係

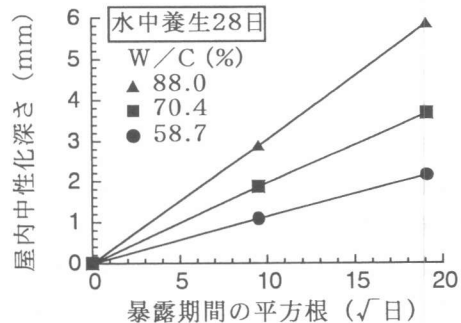


図-5 暴露期間の平方根と屋内中性化深さの関係

これらによると、促進および屋内暴露の場合は、中性化深さと暴露材齢の平方根とは、概ね比例関係にある。

これに対して、屋外暴露の場合には、やや比例関係が損なわれ、また、暴露開始前の水中養生期間によっても傾向が異なっている。

試験期間が限定されており、断定はできないが、屋外試験の結果を $\sqrt{t}$  則で表示する場合には、他の暴露条件に比べて適合性が幾分低下する必要があることに留意する必要があると言える。ただし、このような傾向はCA無混入の場合にも大略同等に認められ、必ずしもCAコンクリート本来の特性と言えるものではなかった。

### 3.3 石炭灰の混入が中性化速度係数に及ぼす影響

図-7~9は、各暴露条件の中性化速度係数を算出したのち、同一W/CのCA無混入のコンクリートに対するCAコンクリートの中性化速度係数の比を求めて、図示したものである。

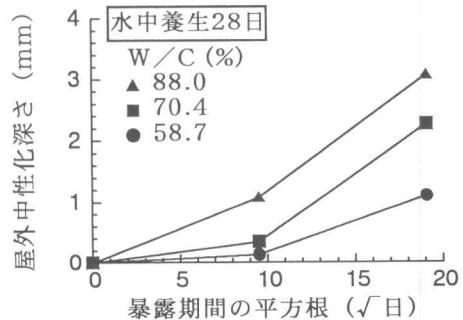


図-6 暴露期間の平方根と屋外中性化深さの関係

図-7に示す促進暴露によれば、 $W/C=70.4\%$ の水中養生7日の場合には、 $CA$ コンクリートは $CA$ 無混入の約1~1.2倍の中性化速度係数が示される。しかし、 $W/C$ を58.7%まで低減すれば、水中養生の期間が7日であっても、 $CA$ 無混入のコンクリートと大略同等の中性化速度係数となることがわかる。

また、 $W/C=58.7\%$ 、水中養生期間を28日とすれば、中性化速度係数は0.8倍程度以下、さらに $CA/C=90\%$ 程度とすれば、中性化速度係数は大略半分以下まで低減し、 $W/C$ が小さく、かつ $CA/C$ の大きい場合には、中性化速度の低減効果が顕著であることがわかる。

一方、図-8の屋内暴露の場合には、 $W/C$ による相違は小さく、中性化速度係数は7日間水中養生した場合で、 $CA$ 無混入の約0.8~0.9倍、28日間水中養生の場合でも約0.6~0.8倍に低減するにとどまる。

図-9の屋外暴露の場合については、中性化速度係数が $CA$ 無混入の約0.4~0.9倍に低減されているが、 $CA/C$ の及ぼす影響は明確にはできない結果となっている。

以上、暴露条件の厳しい場合を除いて、 $CA$ コンクリートの方が中性化速度係数が小さくなった理由としては、 $CA$ の組織空隙の充填とポゾラン反応による組織の緻密化、ならびに $CA$ 混入による粉体量増大がブリーディングを低減し〔3〕、骨材-ペースト

界面の改善がなされたこと、などによって密実な組織が形成されたことが挙げられる。このことが、特に屋内および屋外における中性化速度係数の低減に、有効に作用したものと推察される。

### 3. 4 水セメント比と中性化速度係数の関係

図-10~12に、各暴露条件における $W/C$ と中性化速度係数の関係を示す。

図-10に示す促進暴露の結果によれば、粉体量の著しく多い場合を除いて、 $W/C$ と中性化速度係数の関係は、 $CA$ 混入の有無にかかわらず大略同一の直線で表現できるといえる。

これに対して、図-11および図-12に示す屋内および屋外暴露の結果によれば、 $CA$ コンクリートと $CA$ 無混入のコンクリートに対して、 $W/C$ と中性化速度係数の関係を同一の直線で表示することはできない。しかし、 $W/C$ の増加に伴う中性化速度係数の増大、すなわち直線の勾配は、屋内暴露では $CA$ コンクリートの方がやや小さいが、屋外暴露の場合には、 $CA$ 混入の有無

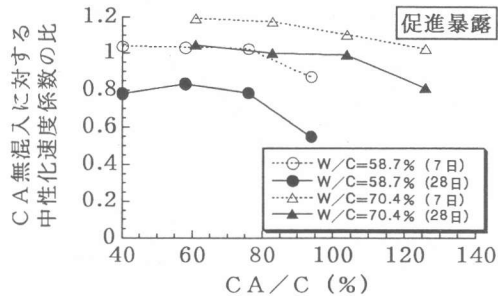


図-7  $CA$ の混入が中性化速度係数に及ぼす影響

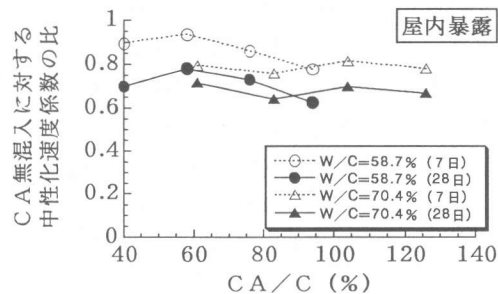


図-8  $CA$ の混入が中性化速度係数に及ぼす影響

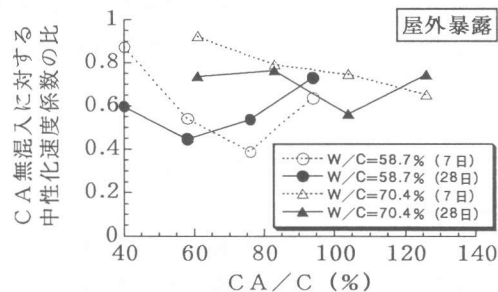


図-9  $CA$ の混入が中性化速度係数に及ぼす影響

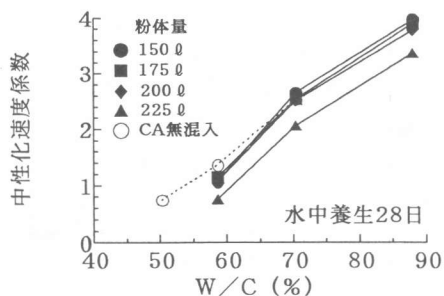


図-10 W/Cと中性化速度係数の関係(促進)

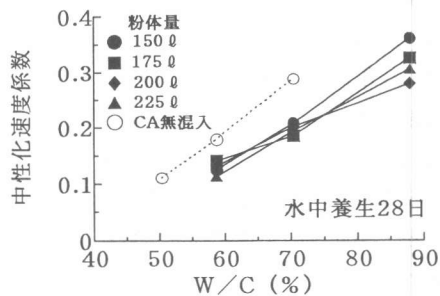


図-11 W/Cと中性化速度係数の関係(屋内)

にかかわらずほぼ同等であった。さらに、CAコンクリートの中性化速度係数は、屋内および屋外暴露を行ったW/Cの大きい領域において、粉体量に応じて異なる傾向も認められた。

以上、W/Cと中性化速度係数の関係を総括的にみれば、通常のコンクリートと同様に、CAコンクリートの中性化特性はこのW/Cと密接に関連し、W/Cで制御することがほぼ可能であるものと考えられる。

また、促進試験の結果を用いれば、粉体量が著しく大きいものを除いて、CAコンクリートの一般的な環境における中性化特性を推定する場合には、CA無混入のコンクリートに比べてほぼ安全側の評価を与えることが示された。

#### 4. まとめ

石炭灰を多量に混用したコンクリートの中性化特性について検討し、本試験の範囲で以下のことがわかった。

- (1) 屋内および屋外環境において、同一W/Cの石炭灰無混入のコンクリートと比較すれば、石炭灰の混入は中性化深さを低減する。
- (2) 促進及び屋内暴露は $\sqrt{t}$ 則が適用できるが、屋外暴露ではややその適合性が低くなる。
- (3) 同一W/Cの石炭灰無混入のコンクリートに対して、石炭灰を多量混入することにより、屋内および屋外環境では中性化速度係数を0.4~0.9倍程度に低減することができる。
- (4) 石炭灰を多量混用したコンクリートの場合にも、この中性化特性は、水セメント比と密接に関係がある。

#### 参考文献

- [1] 栗村滋雄：「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」の改正について、月刊生コンクリート、Vol. 15、No. 6、pp. 9-21、1996. 6
- [2] セメント新聞、セメント新聞社発行、1996. 12. 3
- [3] たとえば、皆根徳明、谷川公一、小谷中昭裕、加藤将裕：石炭灰を多量に混用したコンクリートの強度特性に関する検討、セメント・コンクリート論文集、No. 48、pp. 370-375、1994