

플라이 애쉬 및 高爐水碎슬래그를 混和한 콘크리트의 중성화에 관한 研究

Studies on Carbonation of Concrete with Low-Calcium Fly Ash
and Blast Furnace Slag

長 瀧 重 義*
Nagataki, Shigeyoshi
金 銀 謙**
Kim, Eun Kyum
大 賀 宏 行***
Ohga, Hiroyuki

Abstract

Carbonation of concrete is one type of a chemical process. The reaction mechanism is very complex for the case when low-calcium fly ash and blast furnace slag is added.

When fly ash and blast furnace slag is used as an admixture in concrete, they improve compressive strength in the long term, permeability and chemical resistance of concrete by a pozzolanic reaction and latent hydraulic property.

On the other hand, the pozzolanic reaction of fly ash and latent hydraulic property of the blast furnace slag leads to a reduction of the alkalinity of the concrete. It has been pointed out that this will accelerate the carbonation of the concrete and the corrosion of reinforcement steel embedded in the concrete.

In order to clarify the effect of fly ash and blast furnace slag on the carbonation of concrete, an accelerated carbonation testing of concrete was carried out by varying the conditions of concrete and the initial curing period in water.

The test results of accelerated carbonation were compared to the carbonation test results of concrete stored for 15 years in open air, but protected from rain. As a result, the equation for the rate of carbonation based on compressive strength of concrete was proposed.

要 旨

콘크리트의 中性化는 일종의 化學的 反應이며, 더우기 混和材로서 플라이애쉬와 高爐水碎슬래그를 混和한 경우에는 그 反應 매카니즘이 매우 복잡하다.

* 日本國 東京工業大學 教授, 土木工學科

** 正會員 · 京畿工業開放大學 助教授, 土木工學科

*** 日本國 東京工業大學 土木工學科 助手

최근에는 콘크리트의 성능을 改善시킬 목적으로 시멘트의 일부를 産業副產物인 플라이애쉬 및 高爐水碎슬래그로 混和함으로써 이들에 의한 포졸란反應 및 潛在水硬性에 의해 콘크리트의 中性化가 촉진되어 콘크리트 속의 철근이 蝕蝕될 우려가 있다고 하는 지적이 계속되어 왔다.

本 研究에서는 이상과 같은 觀點으로부터 포졸란反應 및 潛在水硬性이 콘크리트의 中性化에 미치는 영향을 분명히 하기 위하여 콘크리트의 配合條件 및 水中養生期間 등을 변화시켜 自然環境條件과 다른 苛酷한 環境條件下에서 促進中性化實驗을 실시하였다. 또한 이들의 결과를 中性化의 早期判定이라는 점에 重視하여 自然環境下에서 15年間 屋內에 曝露시킨 筆者들의 研究結果와도 比較・檢討를 하여 壓縮強度에 바탕을 둔 새로운 中性化 速度式을 提案하였다.

1. 序 論

石炭을 연료로 하는 火力發電所 등으로부터 大量으로 副産되는 플라이 애쉬와 製鐵所에서 銑鐵을 만들 때 발생하는 高爐水碎슬래그를 콘크리트의 混和材로서 사용할 경우 콘크리트의 품질을 개선시키는데 여러가지 長點을 가지고 있다.

良質의 플라이 애쉬는 일반적으로 球形粒子이기 때문에 콘크리트의 流動性을 개선시키며 單位水量을 감소시켜 블리딩 및 材料分離를 줄일 수 있으며 건조수축이 작아 콘크리트의 龜裂防止에 有效하다.

또한 이들 플라이 애쉬와 高爐水碎슬래그는 소위 포졸란反應과 潛在水硬性에 의해 콘크리트의 조직이 점차 치밀해져 콘크리트의 長期強度가 증대되며 水密性 및 化學抵抗性이 우수하다고 하는 研究結果로부터 세계 각국에서는 댐을 비롯하여 海洋構造物 등에 사용해 오고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

특히 이들 混和材는 다량으로 사용할 경우 최근 세계 각국에서 콘크리트 耐久性의 問題點으로서 話題가 되고 있는 알칼리·骨材反應의 피해를 막는데 有效하다고 하는 연구 결과 등이 발표되고 있다^(5,6).

그러나 플라이 애쉬 및 高爐水碎슬래그를 콘크리트용 混和材로서 사용할 경우 초기강도가 지연되며, 특히 플라이 애쉬의 포졸란反應 및 高爐水碎슬래그의 潛在水硬性에 의해 콘크리트 空隙水中의 알칼리도가 저하함으로써 中性化 및 그에 따른 철근의 蝕蝕이 촉진될 염려가 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

따라서 本 研究에서는 플라이애쉬 및 高爐水碎슬래그를 혼화재로서 사용한 콘크리트의 中性化 現象을 早期에 파악하기 위해 促進中性化實驗을 실시하여 콘크리트의 配合條件, 水中養生期間 및 強度 등이 中性化 現象에 미치는 영향에 관해 검토를 함과 동시에 촉진실험에 있어서의 中性化 速度式을 구하였다.

또한 筆者들에 의해 이미 실시된 연구인 15年間の 自然曝露中性化實驗結果로부터 얻어진 中性化 速度式^(6,9)과 促進式을 비교·검토함으로써 실제의 中性化速度가 早期에 파악될 수 있도록 합리적인 새로운 속도식을 제안하였다.

2. 實驗概要

2.1 使用材料 및 配合

本 實驗에서 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트로서 各 會社의 제품간의 品質의 변동을 줄이기 위해 同一 重量比로 混合하였다. 이들 各社 製品의 시멘트에 대한 物理試驗成績은 表 1에, 化學分析結果는 表 2에 각각 나타내었으며, 플라이 애쉬 및 高爐水碎슬래그에 대한 것은 表 3에 나타내었다.

잔골재는 比重 2.55, FM 2.49인 강모래를, 굵은 골재는 比重 2.63, FM 6.73, 최대치수 20 mm인 강자갈을 사용하였다.

配合는 혼화재의 종류별로 單位結合材量(시멘트+플라이 애쉬(또는 高爐水碎슬래그))을 변화시켜 시멘트 대신에 플라이 애쉬의 경우에는 그의 混和材率을 30%, 高爐水碎슬래그의 경우에는 그의 混和材率을 각각 30, 50, 70%로 하여 슬럼프가 8 ± 1 cm, 空氣量이 $1 \pm 0.5\%$ 인 콘크리트 및 $4 \pm 0.5\%$ 인 AE 콘크리트로 되도록 각각

表 1. Physical Properties of Cement.

Cement Manufactory	Specific Gravity	Fineness		Setting time			1 : 2 Mortar(w/c=0.65)								
		Blaine (cm ² /g)	Sieve 88 µm Resid- ue(%)	Mixing water(%)	Initial (hr-min)	Final (hr-min)	Flow (mm)	Bending strength (kgf/cm ²)				Compressive strength (kgf/cm ²)			
								3d	7d	28d	91d	3d	7d	28d	91d
A	3.10	3,340	0.5	30.5	3-06	4-01	260	31	43	62	78	140	207	305	395
B	3.17	3,270	0.5	28.2	3-27	4-27	266	31	48	69	75	137	235	393	475
C	3.16	3,370	1.1	28.5	3-05	4-15	255	38	49	69	77	173	266	413	470

表 2. Chemical Properties of Cement.

	Chemical Properties(%)											Free Lime (%)	R ₂ O (%)	Sol Na ₂ O (%)	Sol C ₂ O (%)
	L.O.I	insol- uble Resid- ue	SiO ₂	N ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂				
A	2.8	1.1	20.9	4.8	2.5	62.7	1.5	2.1	0.38	0.60	0.2	1.7	0.77	0.11	0.38
B	1.1	0.1	22.1	4.8	3.0	63.5	1.6	1.8	0.27	0.78	0.31	0.6	0.98	0.06	0.42
C	0.8	0.1	21.6	4.9	2.8	64.2	1.8	2.2	0.30	0.43	0.38	0.8	0.58	0.11	0.32

表 3. Physical and Chemical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag.

	Fineness (cm ² /g)	Glass(%)	Chemical properties(%)											
			L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	
Fly Ash	—	—	1.3	59.0	19.8	4.7	2.3	1.5	2.3	2.5	—	—	—	—
Blast Furnace Slag	4,500	98.8	0.1	32.2	14.5	0.4	42.5	6.0	1.8	0.5	0.6	1.1	0.2	2.0

單位水量 및 AE劑量を定하였다. 이들에 대한配合은 表 4와 같다.

2.2 試驗方法

促進中性化試驗은 CO₂의 濃度, 相對濕度, 溫度가 자동으로 조절되는 日本 丸井社에서 제작한 促進中性化裝置를 사용하였다.

本 試驗에서 채택한 中性化 促進條件은 中性化 促進을 우선적인 목적으로 하여 지금까지 발표된 연구결과⁽¹⁰⁻¹²⁾를 바탕으로 CO₂의 농도를 7%, 습도를 50%RH, 온도를 40°C로 하였다.

中性化測定用 콘크리트 供試體로서는 10×10×30cm의 角柱形을 사용하였다. 또한 中性化現象은 콘크리트의 微細組織에 깊은 관계가 있으며, 이들은 콘크리트의 압축강도로 표현될 수 있다는 생각으로부터 콘크리트의 中性化 깊이를 압축강도와의 관계로 나타내 보이기 위해 ϕ10×20cm의 콘크리트 공시체를 제작하였다.

이상과 같은 中性化測定用 공시체 및 압축강도용 공시체는 콘크리트 타설후 1日에서 脫型하여 각각 7日, 28日, 91日間 표준양생을 실시한 뒤 促進中性化 및 압축강도 시험을 하였다.

促進中性化期間은 원칙적으로 각각 1週, 2週, 4週, 7週, 9週間으로 하였으며, 경우에 따라서는 中性化 進行速度 등을 감안하여 일부의 공시체에 대해 그 기간을 적절히 조정하였다.

中性化 깊이는 소정기간 中性化를 실시한 공시체를 割裂에 의해 5cm 간격으로 橫方向으로 잘라내어 그 破斷面에 곧바로 酸·鹽基의 지시약인 페놀프탈레인 1%알콜 용액을 塗布하여 赤色으로 선명하게 着色된 부분의 면적(未中性化領域)에 의해 式(1)로부터 平均中性化 깊이를 구하였다⁽¹³⁾.

$$x = \frac{1}{2} (10 - \sqrt{A}) \dots\dots\dots(1)$$

表 4. Mix Proportion of Concrete.

Admixture		unit binder content (kg/m ³)	replace-ment ratio (%)	unit water content (kg/m ³)	water-cement ratio (%)	water-unit binder con-tent ratio (%)	s/a(%)	stump(mm)	air content (%)	pozzolis 70 (g/m ³)	pozzolis 903 (g/m ³)
No Re- place- ment	Non-AE concrete	250	0	185	74	74	43	72	1.5	—	—
		290	0	185	64	64	43	82	1.3	—	—
		330	0	185	56	56	42	80	1.3	—	—
		370	0	190	51	51	42	75	1.8	—	—
	AE concrete	250	0	165	66	66	44	80	3.8	32.25	3.00
		290	0	165	57	57	43	70	3.2	37.41	3.48
		330	0	166	50	50	42	75	3.7	42.57	4.62
		370	0	170	46	46	41	70	3.3	47.73	5.92
Fly Ash	Non-AE concrete	250	30	178	102	71	44	88	0.9	—	—
		290	30	177	87	61	42	82	1.0	—	—
		330	30	177	77	54	41	88	1.2	—	—
	AE concrete	250	30	159	91	64	43	100	4.0	32.25	17.00
		290	30	159	78	55	42	90	4.7	37.41	19.72
		330	30	158	68	48	41	86	4.5	42.53	19.80
Blast Furna- ce slag	AE concrete	290	50	155	107	53	42	80	4.4	37.41	15.08
		330	30	161	70	49	42	72	4.3	42.57	11.88
			50	157	95	48	41	90	4.4	42.57	17.16
			70	158	160	48	40	80	3.8	42.57	22.44
		370	50	161	87	44	40	75	4.4	47.73	16.28

여기서

A : 未中性化 영역의 면적

x : 中性化 깊이

3. 中性化現象의 時間的 變化

반복되는 乾濕의 영향을 받지 않는 自然曝露 狀態下에서의 中性化 깊이 x의 時間적 變化는 지금까지 많은 연구결과^(10-12, 14-17)로부터 中性化 期間의 平方根, 즉 \sqrt{t} 에 비례한다는 사실이 밝혀졌으며, 筆者들에 의해 發表된 自然條件下에서 曝露시킨 供試體의 시험결과^(8, 9)에 의해서도 확인되었다.

그런데 콘크리트의 中性化 現象을 早期에 파악하기 위해 실제의 自然環境과는 다른 苛酷한 環境條件下에서 콘크리트의 中性化를 촉진시킬 경우, 自然環境條件下에서 曝露된 콘크리트와 동일한 中性化 現象을 보이고 있는지의 여부를

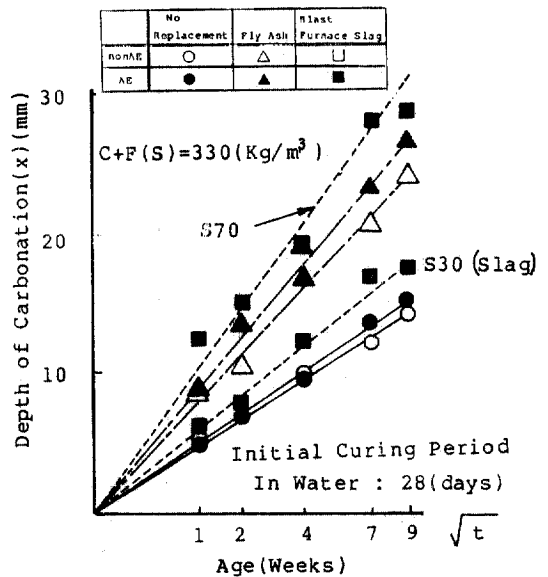


그림 1. Relationship between Age and Depth of Carbonation of Concrete

검토하기 위해 실시한 실험결과를 그림 1에 나타내었다.

이 그림으로부터 中性化를 苛酷한 環境條件下에서 촉진시켰을 경우에 있어서도 中性化 깊이는 자연폭로의 경우와 마찬가지로 \sqrt{t} 에 비례하고 있음을 알 수 있다.

이 현상은 플라이 애쉬 및 高爐水碎슬래그를 시멘트 대신에 混和했을 경우에도 동일한 경향을 보이고 있으며, 또한 AE劑의 첨가 有無, 混和材 混和材率의 변화에도 불구하고 中性化 깊이 x 는 중성화 기간의 平方根 \sqrt{t} 에 비례하고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 사실로부터 콘크리트의 중성화 현상을 早期에 파악하여 콘크리트 구조물 설계시에 철근의 덮개를 정하는 경우에 있어서는 실제로 구조물이 놓이는 환경조건과 전혀 다른 가혹한 환경조건하에서 실시되는 促進試驗方法이 早期判定이라는 관점으로 볼 때 하나의 유효한 手段이 될 수 있음을 그림 1은 보여 주고 있다.

또한 이 그림으로부터 中性化 速度는 기울기인 中性化比率 $V(=\frac{x}{\sqrt{t}})$ 에 비례하고 있음을 보이고 있으며, 이와 같은 경향은 본 실험의 모든 콘크리트에 있어서 일치되고 있음을 알 수 있다.

따라서 中性化速度가 빠르고 늦은 정도는 모두 이 中性化比率를 사용함으로써 간편히 표현할 수 있으며, 이것은 특히 混和材 등 새로운 재료를 사용하였을 경우 中性化 傾向을 파악하는데는 유효한 手段이 될 수 있다.

따라서 이하에서는 각종 要因에 따른 中性化 現象을 中性化比率를 사용하여 고찰을 하고자 한다.

4. 中性化現象에 영향을 미치는 諸要因

4.1 물·시멘트 비

그림 2는 물·시멘트 비와 中性化比率와의 관계를 보인 것이며, 그림 3은 물·結合材 비와 中性化比率와의 관계를 보인 것이다. 당연한 사실이지만 물·結合材 비가 크면 클수록 콘크리트의 中性化比率는 점점 커져 결국 中性化速度는 빨라지고 있다는 사실을 이 그림은 보여 주고 있으며 이와 같은 현상은 지금까지의 많은

연구결과와도 부합되고 있다(7-9, 16, 18-20).

그림 2와 같이 中性化比率를 물·시멘트 비로 표시하면 플라이 애쉬를 시멘트 대신에 30% 混和한 경우에는 전혀 混和하지 않은 경우와 비교해 볼 때 同等의 中性化 傾向을 보이고 있지만, 高爐水碎슬래그를 混和한 경우에는 混和하지 않은 경우와 견주어 보면 중성화 현상은 상당히 지연되고 있음을 알 수 있으며, 이와 같은 현상은 高爐水碎슬래그를 70% 混和한쪽이 더욱 현저하다. 또한 이 그림은 플라이 애쉬보다는 高爐水碎슬래그쪽이 중성화를 지연시키는 효과가 있음을 말해 주고 있다.

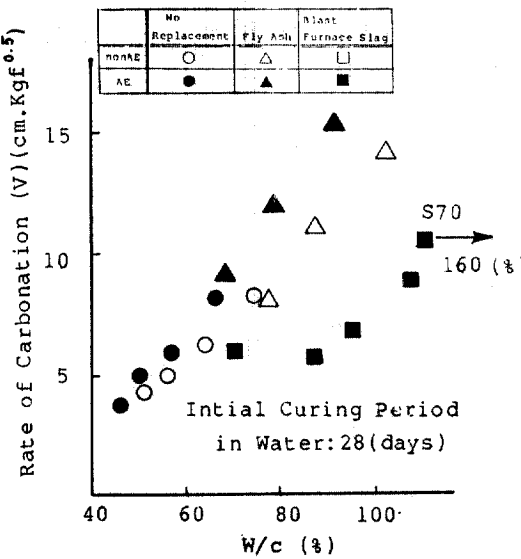


그림 2. Relationship between Water-Cement and Rate of Carbonation

이와 같이 高爐水碎슬래그가 플라이 애쉬에 비해 중성화에 대한 저항성이 큰 이유로서는 高爐水碎슬래그의 潛在水硬性에 의한 반응이 플라이 애쉬의 포졸란反應에 비해 早期에 진행되어 플라이 애쉬를 混和한 콘크리트보다 콘크리트의 表面組織이 더욱 치밀해졌기 때문이라고 생각된다. 특히 플라이 애쉬를 30% 混和한 경우와 混和하지 않은 경우의 중성화 현상이 동등하게 나타난 것은 포졸란反應이 28日 정도에서는 일어나지 않았거나 일어났더라도 경미한 정도에 지나지 않아 中性化를 지연시키거나 촉진시키는데는 크게 寄與하지 못한 것으로 생각된다.

한편 그림 3은 특히 AE劑가 中性化에 미치는 영향을 쉽게 파악하기 위해 보인 것이다. 이 그림으로부터 non AE 콘크리트에 비해 AE 콘크리트 쪽이 同一 물·시멘트 비에서도 中性化速度는 빠르며, 混和材를 混和하지 않는 경우에 비해서 플라이 애쉬를 混和한 쪽이 더 빠른 경향을 보이고 있다. 이들의 이유로서는 AE劑를 첨가할 경우 空氣量의 증대를 가져와 콘크리트 内部에로의 CO₂의 擴散이 쉬워졌기 때문이라고 생각된다. 그런데 CO₂의 확산은 콘크리트의 細孔量에 깊은 관계가 있으며 그 중에서도 開孔量과 직접적인 관련성을 가지고 있다. 그러나 AE劑를 첨가하여 발생된 連行空氣泡은 거의가 독립된 공극임을 생각해 볼 때 더욱 상세한 검토가 요망된다.

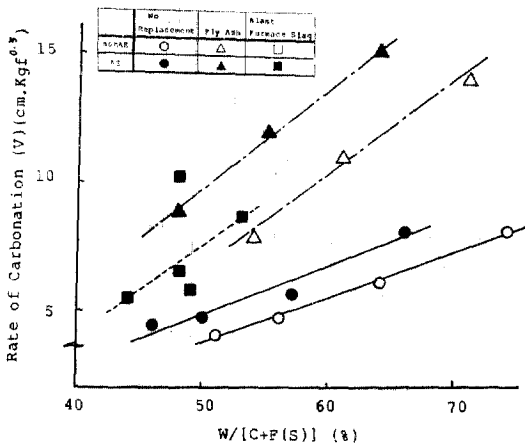


그림 3. Influence of Water-Binder Content on Rate of Carbonation

4.2 前置水中養生期間

그림 4는 水中養生期間이 中性化에 미치는 영향을 검토하기 위해 보인 것이다. 일반적으로 수중양생기간이 길어질수록 중성화에 대한 저항성은 증대된다고 하는 많은 연구결과^(7-9, 18, 21)와 마찬가지로 本 實驗結果에서도 同一한 경향을 보이고 있다.

그런데 이들 중성화 저항성을 높이는데 있어서의 수중양생기간의 영향은 混和材를 混和한 쪽이 混和하지 않는 경우에 비해 상당히 크며, 특히 플라이 애쉬를 30% 混和한 경우에는 수중양생 28일까지의 영향이 현저한데 비해 高爐水碎

슬래그의 경우에는 91일까지의 영향도 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 수중양생 28일까지는 플라이 애쉬를 混和한 경우나 高爐水碎슬래그를 混和한 경우나 모두 시멘트의 水和反應에 의한 콘크리트 조직의 치밀화의 진행에 따른 결과이지

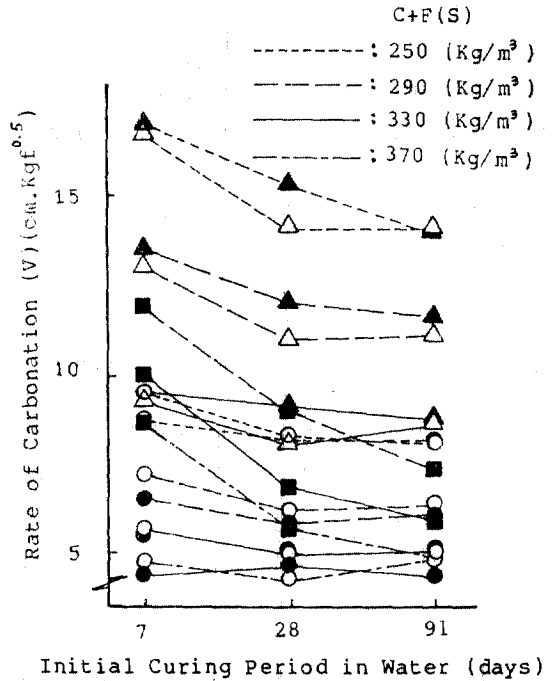


그림 4. Influence of Initial Curing Period in Water on Rate of Carbonation

단, 수중양생 28일 이후에 있어서는 플라이 애쉬에 의한 포졸란反應이 미약한데 비해 高爐水碎슬래그의 潛在水硬性에 의한 반응은 활발히 일어나고 있음을 의미한다.

따라서 플라이 애쉬를 混和한 경우, 中性化에 관해서는 초기에 28일 정도 水中養生을 실시하면 그 이후에는 수중양생기간의 영향은 거의 없지만, 高爐水碎슬래그의 경우에는 장기간에 걸쳐 수중양생의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

4.3 單位結合材量 및 混和材率

그림 5 및 그림 6은 單位結合材量 및 混和材率이 콘크리트의 중성화 현상에 미치는 영향을 비교 검토하기 위해 수중양생 28일을 실시한 콘

크리트를 한 예로 보인 것이다. 그림 5로부터 어떠한 콘크리트에 있어서도 單位結合材量을 증가시키면 중성화는 크게 억제되며, (7-9) 單位結合材가 同量일 경우에는 混和材를 전혀 混和하지 않은 콘크리트, 高爐水碎슬래그, 플라이 애쉬를 混和한 콘크리트의 순서로 중성화 속도가 빨라지고 있음을 알 수 있다.

또한 混和劑로서 AE減水劑를 사용하여 空氣量을 $4 \pm 1\%$ 로 조절하였을 때는 혼화재를 첨가하지 않은 경우, non AE 콘크리트와 비교해 볼 때 중성화 속도는 單位結合材量에 관계없이 同等의 값을 보이고 있다. 그러나 플라이 애쉬를 混和한 경우에는 AE減水劑를 사용하면 물·시멘트비가 감소함에도 불구하고 AE 콘크리트쪽이 중성화 속도가 빠름을 알 수 있다.

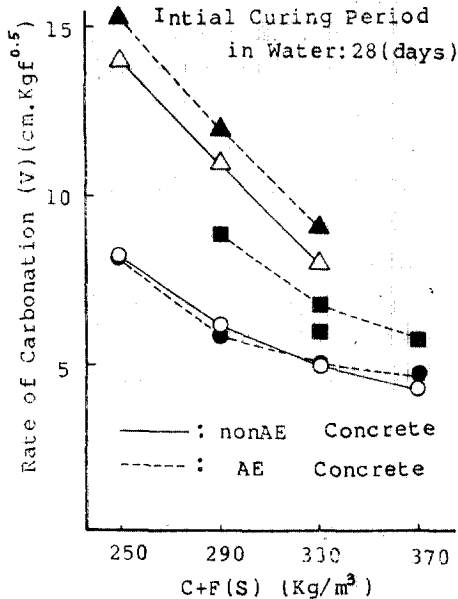


그림 5. Influence of Binder Content on Rate of Carbonation

이와 같은 원인은 혼화재를 混和하지 않은 경우에는 초기재령하에서 콘크리트 조직의 치밀화가 대부분 진행되어 버리기 때문에 CO₂의 확산 속도가 지연되는 反面, 플라이 애쉬를 混和한 경우에는 포졸란反應이 시멘트의 수화에 비해 상당히 늦게 일어나 재령초기 콘크리트 조직의 치밀화가 그다지 진행되지 않은 상태에서 CO₂

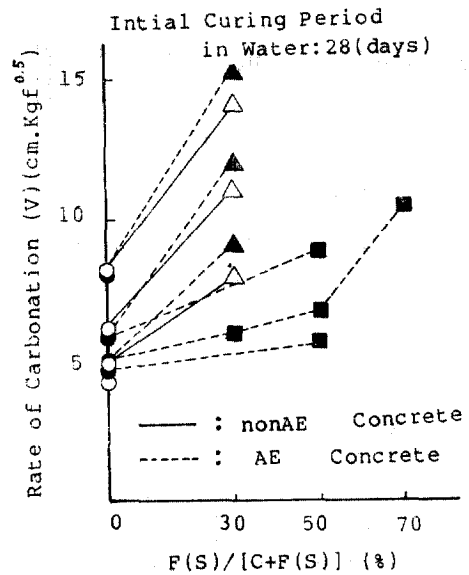


그림 6. Influence of Fly Ash and Blast Furnace Slag Replacement on Rate of Carbonation

의 콘크리트에로의 擴散이 쉬워졌기 때문이라고 볼 수 있다.

5. 포졸란反應 및 潛在水硬性和 中性化

이상에서 검토한 바와 같이 콘크리트의 중성화 현상은 配合條件 및 養生 등의 영향을 크게 받고 있으며, 이들은 콘크리트 조직의 緻密度를 지배한다. 그런데 콘크리트의 品質을 대표하고 있는 압축강도는 일반적으로 콘크리트의 微細構造 및 細孔組織에 의존하는 바 이들은 또한 플라이 애쉬와 高爐水碎슬래그를 혼합하였을 경우 포졸란反應 및 潛在水硬성에 관련된다.

따라서 여기서는 우선 콘크리트의 압축강도와 포졸란反應 및 潛在水硬성을 관련시켜 비교 검토를 실시한 뒤 중성화 현상을 압축강도와 관련시켜 考察해 보고자 한다.

그림 7은 포졸란反應 및 潛在水硬성이 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 單位結合材量 330kg/m³인 경우를 一例로 보인 것이며, 表 5는 이 그림을 바탕으로 混和材를 전혀 混和하지 않은 경우의 壓縮強度를 1로 하였을 때 플라이 애쉬 및 高爐水碎슬래그의 強

表 5. The Comparison of Ordinary Portland Cement Concrete with Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete for Compressive Strength.

Initial Curing Period in Water	ordinary portland cement concrete	Fly Ash concrete	Blast Furnace Slag Concrete		
		Replacement ratio(%)			
		30	30	50	70
7d	1	0.59	0.70	0.58	0.56
28d	1	0.62	0.77	0.77	0.77
91d	1	0.72	0.85	0.80	0.85

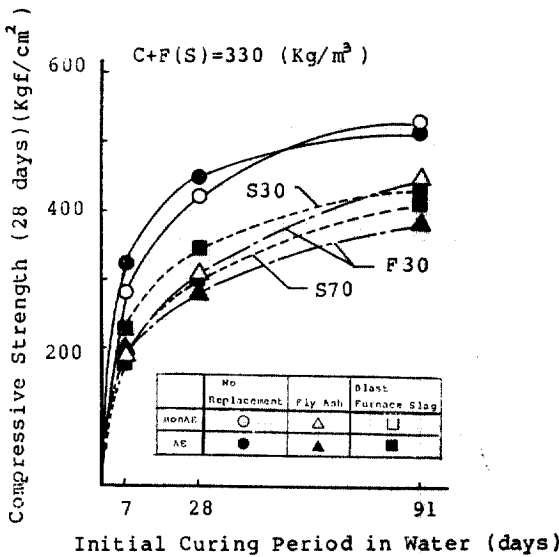


그림 7. Relationship between Initial Curing Period in Water and Compressive Strength

度增加比率를 알기 쉽게 보인 것이다.

그림 7 및 表 5로부터 플라이 애쉬의 포졸란 반응 및 高爐水碎슬래그의 潛在水碎성에 의한 콘크리트의 壓縮強度는 수중양생기간의 증가와 더불어 더욱 높아져 가고 있다.

또한 이상과 같은 값을 비교해 볼 때 混和材率이 同一한 경우 플라이 애쉬에 비해 高爐水碎슬래그쪽이 약 1.2 배의 강도증가를 보이고 있어 포졸란反應에 비해서는 潛在水硬性이 더욱 초기재령에서 활발히 일어나고 있음을 示唆해 주고 있다.

결국 이상의 사실로부터 混和材를 添加하면

재령초기에는 압축강도가 混和材를 混和하지 않은 경우에 비해 낮아 中性化 현상은 현저하지만 수중양생을 길게 할 경우 압축강도비율이 증가되어 中性化 速度는 둔화되며, 이 현상은 플라이 애쉬에 비해서는 高爐水碎슬래그를 混和한쪽이 더욱 크다.

따라서 이들과 같은 복잡한 化學反應에 의한 콘크리트의 中性化現象은 플라이 애쉬 및 高爐水碎슬래그 등을 混和한 경우에 있어서도 混和材를 混和하지 않은 경우^(8,9,12,14,16,20,22-25)와 마찬가지로 압축강도로의 표현이 가능하게 되었으므로 이하에서는 이들의 中性化現象을 定量化하는 데는 콘크리트의 압축강도를 그의 기본으로 하고자 한다.

그림 8은 압축강도를 바탕으로 중성화 현상을 數式化하기 위해 콘크리트의 표준양생을 실시한 28日 압축강도와 中性化比率과의 관계를

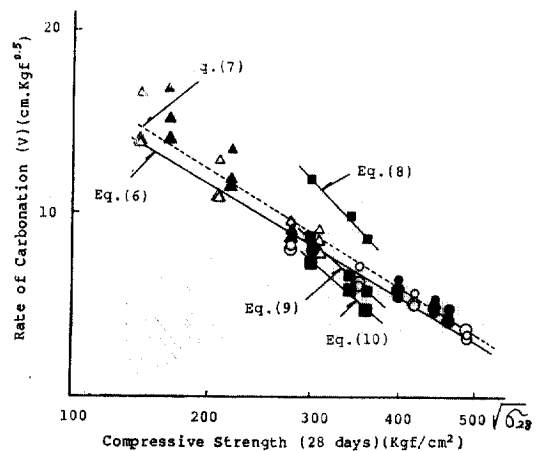


그림 8. Relationship between Compressive Strength and Rate of Carbonation

보인 것이다. 이 그림으로부터 中性化比率은 28 日 압축강도의 平方根과 좋은 相關關係를 가지고 반비례하고 있음을 알 수 있다.

混和材를 첨가하지 않은 콘크리트에 있어서는 AE 劑의 첨가 有無에도 불구하고 수중양생기간 28 日과 91 日의 차이는 거의 무시될 수 있으며, 플라이 애쉬를 30% 混和한 콘크리트에 있어서는 거의 같은 값을 보이고 있다. 高爐水碎슬래그를 50% 混和한 경우에는 수중양생기간에 따라 中性化比率이 相異하며 재령 7 日의 경우에는 그 차이가 현저하다. 더욱이 이들의 현상은 그림 4 로부터도 확인되었다.

또한 $\sqrt{\sigma_7}$ 및 $\sqrt{\sigma_{91}}$ 에 대해 각종 中性化比率과의 관계에 대해서도 검토를 가하였지만, 그림 8 과 같은 同等의 결과를 얻었다. 그러나 28 日 표준양생한 압축강도가 콘크리트의 品質을 판정하는데 일반적 기준으로 사용되고 있기 때문에 中性化에 대해서도 σ_{28} 을 基準으로 하였다.

6. 中性化速度式

콘크리트 内部에로의 CO₂의 擴散은 靜止擴散이라는 가정하에서 Fick의 第1法則을 적용하면 그림 9와 같이 單位時間(t)當 임의의 면적 F_D를 통과하는 CO₂의 擴散量 dQ는 다음 식으로 나타낼 수 있다^(12,14). 즉,

$$dQ = D_B \cdot F_D \cdot \frac{|C_1 - C_2|}{x} dt \dots \dots \dots (2)$$

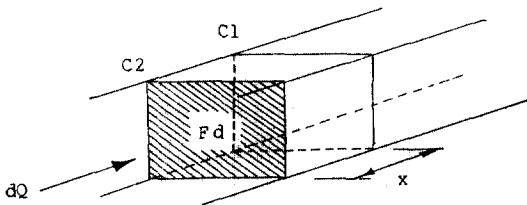


그림 9. Model of Fick's Diffusion

또한 中性化 境界面까지 확산한 CO₂가 시멘트의 水和生成物을 전부 중성화시킨 후에 다음의 未中性化領域으로 확산해 간다고 가정하면 다음 식이 성립한다.

$$dQ = a \cdot F_D \cdot dx \dots \dots \dots (3)$$

따라서 式(2) 및 式(3)으로부터 中性化 깊이

x는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x = \sqrt{\frac{2D_B |C_1 - C_2|}{a}} \sqrt{t} \dots \dots \dots (4)$$

여기서

- D_B : 中性化領域에서의 콘크리트의 擴散係數
- a : 시멘트 水和生成物이 中性化하는데 必要한 CO₂ 消費量
- C₁ : 中性化 境界面에서의 CO₂의 농도로서 보통 零
- C₂ : 大氣中の CO₂의 농도
- t : 中性化 期間
- x : 中性化 깊이

既往의 연구결과⁽⁴⁾로부터 그림 10과 같이 콘크리트의 擴散係數 D_B의 平方根 $\sqrt{D_B}$ 와 콘크리트의 압축강도 σ의 平方根 $\sqrt{\sigma}$ 와는 거의 반비례 관계에 있다는 사실로부터 중성화깊이 x는 a 및 C₂를 상수로 놓으면 式(4)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

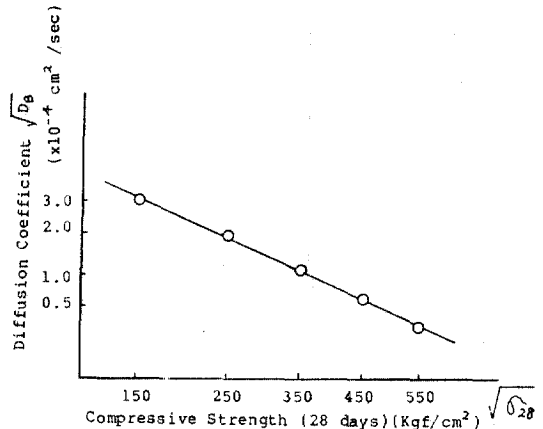


그림 10. Relationship between Diffusion Coefficient and Compressive Strength

$$x = (A - B\sqrt{\sigma}) \sqrt{t} = V\sqrt{t} \dots \dots \dots (5)$$

여기서 V는 中性化 깊이 x와 \sqrt{t} 와의 기울기, 즉 中性化比率이며 그림 8로부터 압축강도의 함수로 표현할 수 있다. 또한 이 그림으로부터 V는 플라이 애쉬의 混和 有無에도 불구하고 하나의 식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 따라서 각각의 경우에 대한 중성화 속도식은 式(5)로부터 다음과 같이 된다.

○ 플라이 애쉬를 混和하지 않은 경우 및 30% 混和한 경우

$$x = \alpha(27.6 - 1.14\sqrt{\sigma_{28}})\sqrt{t} \text{ (non AE)} \quad (6)$$

$$x = \alpha(30.4 - 1.24\sqrt{\sigma_{28}})\sqrt{t} \text{ (AE)} \quad \dots\dots(7)$$

여기서 non AE 콘크리트의 경우

수중양생기간 7日 : $\alpha = 1.09$

수중양생기간 28日 : $\alpha = 1.00$

수중양생기간 91日 : $\alpha = 1.00$

AE 콘크리트의 경우

수중양생기간 7日 : $\alpha = 1.30$

수중양생기간 28日 : $\alpha = 1.00$

수중양생기간 91日 : $\alpha = 1.05$

○ 高爐水碎슬래그 50% 混和한 경우(AE 콘크리트)

수중양생기간 7日 :

$$x = (44.253 - 1.865\sqrt{\sigma_{28}})\sqrt{t} \quad \dots\dots(8)$$

수중양생기간 28日 :

$$x = (41.021 - 1.855\sqrt{\sigma_{28}})\sqrt{t} \quad \dots\dots(9)$$

수중양생기간 91日 :

$$x = (31.259 - 1.381\sqrt{\sigma_{28}})\sqrt{t} \quad \dots\dots(10)$$

한편 기왕의 연구^(8,9)인 15年間 自然條件下에서의 曝露試驗에 있어서는 플라이 애쉬를 混和하지 않은 경우 및 30% 混和한 콘크리트의 수중양생기간이 7日과 91日의 경우 및 non AE에 대해서만 실시하였으나 이들 시험결과도 촉진시험과 같이 콘크리트의 중성화 현상은 配合條件, 수중양생기간 등에 영향을 받고 있어 non AE 콘크리트 및 AE 콘크리트의 중성화 속도식은 서로의 相關關係로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \beta(2.20 - 0.089\sqrt{\sigma_{28}})\sqrt{t} \text{ (non AE)} \quad (11)$$

$$x = \beta(2.53 - 0.103\sqrt{\sigma_{28}})\sqrt{t} \text{ (AE)} \quad \dots\dots(12)$$

여기서 non AE 콘크리트의 경우

수중양생기간 7日 : $\beta = 1.27$

수중양생기간 28日 : $\beta = 1.00$

수중양생기간 91日 : $\beta = 1.00$

AE 콘크리트의 경우

수중양생기간 7日 : $\beta = 1.44$

수중양생기간 28日 : $\beta = 1.00$

수중양생기간 91日 : $\beta = 1.00$

그런데 비록 수중양생기간의 영향은 중성화시험의 환경조건에 의해 다소 다른 경향을 보이고

있지만, 식(6)과 식(11)의 係數에 대한 比率이 일정한 값을 보이고 있으므로 本試驗의 조건하에서는 촉진중성화시험으로부터 자연조건하에서 屋內에 폭로된 콘크리트의 경우에 대한 中性化깊이의 예측이 可能하리라고 판단된다.

결국 促進中性化試驗은 自然條件下에서의 屋內曝露試驗에 대해 表 6과 같은 中性化促進을 나타내었다.

表 6. The Comparisons of Accelerated Carbonation Speed and Test Results of concrete Stored in Open Air, but Protected from Rain.

	FlyAsh Concrete(Replacement Ratio : 30%)	Blast Furnace Slag Concrete(Replacement Ratio : 50%)
7d	10.8	25.6
28d	12.6	17.1
91d	12.6	12.9

7. 結 論

本實驗 研究에서 얻은 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 促進中性化試驗에 있어서의 中性化깊이는 自然條件下에서의 경우와 마찬가지로 時間의 平方根에 비례한다.

(2) 中性化現象을 물·시멘트비로 표시할 경우 플라이 애쉬 및 高爐水碎슬래그의 混和에 의한 中性化 促進은 存在하지 않으며 오히려 中性化를 지연시키는데 效果가 있다.

(3) 中性化에 미치는 수중양생기간의 영향은 플라이 애쉬를 混和한 경우 28日, 高爐水碎슬래그를 混和한 경우에는 91日까지로 본다.

(4) 콘크리트의 中性化現象은 물·시멘트비가 작을 수록, 水中養生期間이 길 수록, 單位結合材量이 클 수록, 混和材의 混和材率이 작을 수록 지연된다.

(5) AE 減水劑의 첨가에 의해 單位수량은 감소하지만 空氣量이 증대되어 non AE에 비해 AE 콘크리트 쪽이 同一 물·시멘트비의 경우 中性化速度는 다소 커진다.

(6) 促進中性化試驗에 있어서의 中性化 깊이는 自然조건하의 경우와 마찬가지로 콘크리트 압축강도로 나타낼 수 있다.

(7) 促進中性化試驗結果와 自然條件下에서의 試驗結果는 서로 좋은 相關性을 보이고 있어 促進試驗에 의한 自然環境下의 中性化速度 예측이 可能하다.

參 考 文 獻

1. 小林正几, "Fly Ash·포조란質 混和材", 콘크리트 工學(日本), Vol. 16, No. 3, Mar. 1987.
2. 笠井順一, "高爐슬래그가 콘크리트에 미치는 영향", 콘크리트工學(日本), Vol. 19, No. 11, Nov. 1981.
3. 1983年度 石炭利用技術振興補助事業試驗研究 成果報告書(日本), "石炭灰의 有効利用에 관한 研究 1," Apr. 1984.
4. Fuji Technology, "石炭灰 處理시스템과 有効利用 技術"
5. Gutt, W., Nixon, P.J. & Gaze, M.E., "Fly Ash and Alkali Aggregate Reaction,"
6. Duncan, M.A.G., Swenson, E.G., Gillott, J.E. & Foran, M.R., "Alkali-aggregate Reaction in Nova Scotia, I Summary of a five year study," *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 1, 1973, pp. 55~69.
7. 日本土木學會, "Fly Ash를 混和한 콘크리트의 中性化와 鐵筋의 發錆에 관한 長期研究", 콘크리트 라이브리리, 第20號(第1次), 1968., 第53號(第2次), 1984.
8. 金銀謙, "Fly Ash를 混合한 콘크리트의 中性化에 관한 研究", 碩士論文, 東京工業大學(日本), 1986.
9. Nagataki, S., Ohga, H. & Kim, E.K., "Effect of Curing Conditions on the Carbonation of Concrete with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement in the Longterm Tests," *Proc. of 2nd Int. Confer. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*.
10. 木村敏三, "RC 建築物의 콘크리트強度와 耐久性", 鹿島出版會(日本), 1981.
11. 森 徹, 白山和久, 上村克郎, 依田彰彦, "各種 시멘트 콘크리트의 炭酸化", 시멘트 콘크리트, No. 307, Sept. 1972, pp. 40~46.
12. Martin, Ranen, & Schiebl, P., "Karbonatisierung von Beton ans Verschieclenen Zementen," *Betonwerkt Fertigteil-Technik*, Heft 12, München, 1975, pp. 588~590.
13. RILEM DRAFT DECOMMENDATION, "Measurement of Hardended Concrete Carbonation Depth cpc-18," *Materials of Constructions*, Vol. 17, No. 102, 1984, pp. 435~440.
14. Schiebl, P., "Zun Frage der zulässigen Ribbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons," Ausschuss für stahlbeton, Heft 255, Berlin, 1976.
15. 內田祥三, 濱田 稔, "鋼 및 콘크리트의 耐久試驗" 建築雜誌, 第516號, 1928, pp. 1287~1303.
16. Smolczyk, H.G., "Written Discussion, On Carbonation," *Proc. of The Fifth Int. Symposium on the Chemistry of Cement*, Vol. III, Tokyo, 1968, pp. 369~382.
17. Weber, H., "Methods for calculating the progress of carbonation and the associated life expentancy of reinforced concrete components," *Betonwerk Fertigteil-Technik*, Heft 8, 1983, pp. 508~514.
18. Fattuhi, N.I., "Carbonation of Concrete as affected by mix constituents and initial water curing period," *Materials of Constructions*, Vol. 19, No. 110, 1986, pp. 131~136.
19. Tsukayama, R., Abe, H. & Nagataki, S., "Long-term experiments on the neutralisation of concrete mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement," *Proc. 5th. Int. Symposium on Chemistry of cement*, V-ISCC, Tokyo, 1968.
20. Martin, H. & Greger, H., "Corrosion of steel due to the carbonation of concrete," *RILEM Symposium Durability of Concrete*, 1969, pp. D-219~D239.
21. Ho, D.W.S. & Lewis, R.K., "Effectiveness of fly ash for strength and durability of concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp. 793~800.
22. Wesche, K. & Schubert, P., "Properties of Mortars and Concrete made with Fly Ash," *Simpos. Materials Research Society*, Annual Meeting, Boston, 1981, pp. 225~232.
23. Schubert, P. & vom Berg, W., "Properties of fly-ash and of mortar and concrete containing it, Part 2," *Betonwerk Fertigteil-Technik*, Heft, 1979.

24. vom Berg, W., "Flugasche als Betonzusatzstoff nach DIN 1045-Anforderungen, Eigenschaften und Auswirkungen auf den Beton," VGB Kraftwerkstechnik 62, Heft 11, Nov., 1982.

25. Nischer, P. & Wien, "Effect of Environment and Concrete Quality on Carbonation," Betonwerk Fertigteile-Technik, Heft", 1984.

(接受: 1987. 7. 25)