

Fly Ash 콘크리트의 脆弱物性 改善方案에 관한 考察

蔣 鍾 卓

〈韓國建設技術研究院 構造研究室 研究員〉

1. 概 要

Fly Ash 콘크리트는 一般 콘크리트의 配合에 있어서 시멘트의 一部를 適當量의 Fly Ash로 대체하여 만든 콘크리트를 말하고, 콘크리트의 物性 改善이나 製造 單價를 節減하기 위해 使用되고 있다.

一般的으로 Fly Ash 콘크리트는 長期材令(約 90日 以後)에 있어서 強度나 耐久性 等の 物性值가 Fly Ash를 혼입하지 않은 콘크리트보다 같거나 優秀하지만, 早期材令에 있어서는 所要強度 確保가 매우 困難하다. 또 콘크리트의 連行空氣量 管理에도 多少의 問題點이 惹起되고 있다.

따라서 本 稿에서는 Fly Ash 콘크리트의 脆弱物性, 즉, 連行空氣量 및 早期強度에 대한 改善方案을 考察하였다.

2. Fly Ash 콘크리트의 脆弱物性 改善方案

2. 1 連行空氣量

Fly Ash를 콘크리트용 混和材로 使用한 AE 콘크리트에서는 콘크리트 中の 所要空氣量 確保가 問題點으로 擡頭된다. 이것은 Fly Ash中의 未然炭素나 Cenosphere 等に 의해 AE劑가

吸着되어 連行空氣量이 감소하기 때문이다.

一般的으로 Fly Ash의 混合에 따른 AE劑 使用量의 增加比率은 Fly Ash의 種類 및 混合率, 특히 未然炭素의 質과 量에 따라 크게 달라진다.

따라서, Dam과 같이 Fly Ash를 多量 使用하는 매스콘크리트構造物 工事現場에서는 Fly Ash의 品質이나 混合率에 따라 AE劑 所要量이 變化되어 連行空氣量의 管理가 매우 困難하고 콘크리트 施工上 支障을 招來한다.

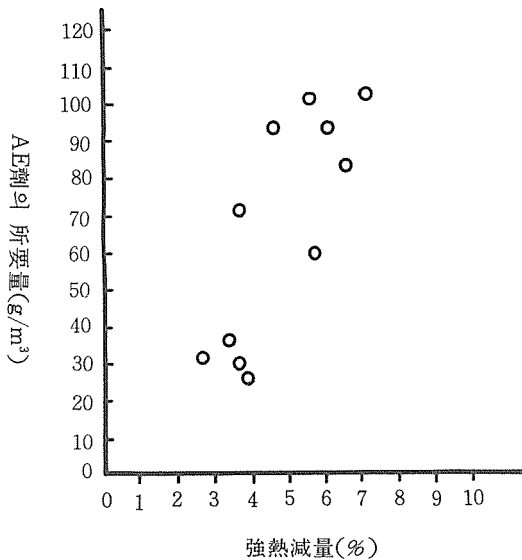
(1) 未然炭素의 AE劑 吸着

一般的으로 Fly Ash에 含有되어 있는 未然炭素의 AE劑 吸着메카니즘은 다음과 같다.

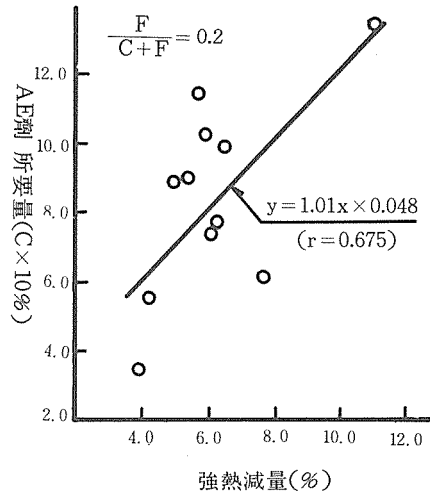
Fly Ash中의 未然炭素는 化學構造的으로 AE劑의 成分中 親油性 部分을 吸着하는 性質이 強하다. 이때문에 親油性이 적은 AE劑는 未然炭素의 吸着作用으로 親油性이 消失되어 界面 活性 및 空氣連行 能力이 減少한다.

그림 1, 2, 및 3에는 國產 Fly Ash의 強熱減量과 AE劑 吸着量, 強熱減量과 AE 콘크리트의 AE劑 所要量과의 關係가 各各 나타나 있다.
1), 2)

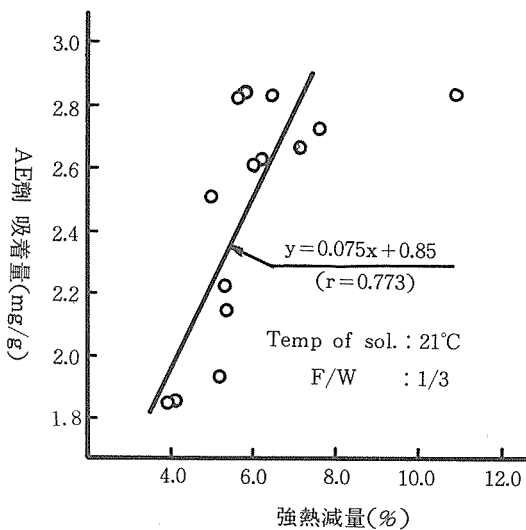
그림 1, 2, 및 3에서 알 수 있는 바와 같이 Fly Ash의 強熱減量과 AE劑 所要量은 明確한 線形關係를 나타내지 않지만 어느 程度 相關性이 있는 것으로 보인다. 그러나, 強熱減量이 同一



<그림 1> Fly Ash의 強熱減量과 AE劑 所要量과의 關係



<그림 3> Fly Ash의 強熱減量과 AE 콘크리트의 AE劑 所要量과의 關係



<그림 2> Fly Ash의 強熱減量과 AE劑 吸着量과의 關係

하더라도 AE劑 所要量에 差異가 發生하는 것은 Fly Ash中 未燃炭素의 吸着活性이나 Cenosphere의 量, 粉末度 등이 다르기 때문이다.

(2) Fly Ash 콘크리트用 AE劑

Fly Ash 콘크리트用 AE劑는 前述한 바와 같이 親油基가 큰 界面活性劑로서 어느 程度 未燃炭素의 吸着作用에 대하여도 界面活性劑로서의 性能을 喪失하지 않고 空氣連行能力을 갖는 것이어야만 한다.

표 1~4에 Fly Ash 콘크리트용 特殊AE劑 試驗結果가 나타나 있다.³⁾

표 2에는 Fly Ash 및 AE劑의 種類에 따른 콘크리트의 空氣量이 나타나 있다.

표 2에 있어서 콘크리트의 空氣量은 AE劑의 吸着作用이 가장 큰 Fly Ash A는 Vinsol Resin 0.04%의 使用으로 空氣量은 3.9%이고 同一 使用量으로 Fly Ash를 混合하지 않은 境遇의 空氣量 20%에 비해 큰 差異를 나타낸다. 그러나, 特殊 AE劑를 사용한 境遇에는 Fly Ash의 種類 및 混合有無에 關係없이 連行空氣量은 거의 비슷하다.

표 3에는 Fly Ash의 混合率과 空氣量과의 關係가 나타나 있다.

여기서 알 수 있는 바와 같이 Fly Ash의 混合率이 變化할 境遇, 콘크리트의 空氣量에 미치는 影響은 Vinsol Resin을 使用한 境遇 Fly

〈표 1〉 Fly Ash의 種類 및 Methylene Blue 吸着量

Fly Ash의 種類	強熱 減量 (%)	Blaine法 比表面積 (cm ² /g)	Methylene Blue吸着量	
			Fly Ash 1g當 (×10 ⁻⁵ g)	未燃分 1g當 (×10 ⁻² g)
시멘트	-	3,300	-	-
A	1.71	3,350	94.0	55.0
B	1.38	3,800	41.6	30.1
C	0.10	3,220	1.6	16.0

Ash의 混合率 30%의 것은 Fly Ash를 混合하지 않은 것에 비해 約 8.5배의 AE劑가 所要되지만, 特殊 AE劑의 境遇는 同一 使用量으로 거의 비슷한 空氣量을 얻을 수 있다.

표 4에는 Fly Ash 混合率 및 AE劑 種類에 따른 콘크리트의 壓縮強度試驗 結果가 나타나 있다.

여기서 알 수 있는 바와 같이 特殊 AE劑를 使用한 Fly Ash 콘크리트의 壓縮強度는 Vinsol Resin, Pozzoloth 等の 混和劑를 使用한 境遇에

〈표 2〉 Fly Ash 및 AE劑의 種類에 따른 콘크리트의 空氣量

AE劑의 種類	AE劑 使用量 (%)	Fly Ash의 種類	W/(C+F) (%)	슬럼프 (cm)	空氣量 (%)	AE劑의 種類	AE劑 使用量 (%)	Fly Ash의 種類	W/(C+F) (%)	슬럼프 (cm)	空氣量 (%)
-	0	-	53.0	5	1.1	-	0	B	51.6	5.5	1.0
		A	51.3	6	0.9			C	50.0	6	1.2
		-	48.8	5	5.2			-	40.5	6.5	3.3
Vinsol Resin	0.01	A	52.2	7.5	1.2	特殊 AE劑	0.025	A	40.5	7.5	3.3
		B	50.1	5.5	1.7			B	48.6	6	3.0
		C	45.2	7.5	5.8			C	45.4	5	4.3
	0.02	-	45.9	7.5	11.0		0.05	-	48.7	5.5	5.0
		A	51.7	7.5	1.2			A	48.9	6.5	4.5
		B	49.7	6	3.5			B	47.2	7	5.1
	0.04	C	40.8	7.5	4.5		0.01	C	42.5	6.5	5.5
		-	43.0	7.5	20.0			-	47.5	7.5	8.8
		A	48.7	6.5	3.9			A	46.6	6	7.8
			B	45.2	7.5		8.5	B	45.7	7.5	8.7
			C	-	-		-	C	41.0	6.5	8.5

* C : F = 8 : 2 (重量比), G_{max} = 25mm, C = 280~300kg/m³, G/S = 1.7 (重量化)

〈표 3〉 Fly Ash 混合率 콘크리트의 空氣量

Fly Ash A 混合率 (%)	AE劑 使用 無				Vinsol Resin				特殊 AE劑			
	AE劑 使用量 (%)	W/(C+F) (%)	슬럼프 (cm)	空氣量 (%)	AE劑 使用量 (%)	W/(C+F) (%)	슬럼프 (cm)	空氣量 (%)	AE劑 使用量 (%)	W/(C+F) (%)	슬럼프 (cm)	空氣量 (%)
0	0	53.0	5	1.4	0.007	46.7	6	5.2	0.05	48.2	5.5	5.2
10	0	51.3	6.5	1.2	0.03	45.6	6.5	5.7	0.05	48.2	6	4.9
20	0	51.3	6	0.9	0.05	46.1	5	5.0	0.05	48.9	6.5	5.0
30	0	51.0	6.5	0.9	0.06	45.6	6	4.3	0.05	48.6	6.5	4.2
40	0	51.5	7	0.8	0.08	46.0	7.5	5.0	0.05	49.0	6	4.2

* Fly Ash의 種類 : 強度減量 1.71%, Blaine 比表面의 3,350 cm²/g

비해 多少 작게 나타났고, 또 30% 및 40%를 혼합한 境遇 다른 AE劑와는 比較하지 않았지만, AE劑를 혼합하지 않은 콘크리트 壓縮強度의 85~93%를 나타내고 있다.

以上에서 알 수 있는 바와 같이 Fly Ash 콘크리트用 特殊AE劑는 Fly Ash의 種類 및 品質, 特히 未炭素의 量에 關係없이 항상 一定量의 AE劑를 使用하여 거의 一定한 空氣量을 確保할 수 있다.

따라서, 콘크리트用 混和材로 Fly Ash를 使用할 境遇, Fly Ash 콘크리트의 所要 進行空氣量 確保 및 管理는 Fly Ash 콘크리트用 AE劑를 使用함으로써 解決할 수 있다. 아울러 國內에 있어서도 國產 Fly Ash 品質에 適合한 Fly Ash 콘크리트用 AE劑의 開發 및 普及이 切實히 要請된다.

2. 2 早期強度

(1) Fly Ash 콘크리트의 強度發生 메카니즘
一般的으로 Fly Ash 콘크리트에 있어서 結

合材(시멘트+Fly Ash)의 硬化過程은 그림 4와 같다.

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 Fly Ash와 포틀랜드 시멘트의 水和反應은 本質的으로 포틀랜드 시멘트를 構成하는 Alite(C₃S) 및 Belite(β-C₂S)의 水和에 의해서 放出되는 水酸化칼슘(Ca(OH)₂)과 Fly Ash의 水和反應이다. 이것은 포졸란 反應으로 잘 알려져 있고 Fly Ash 콘크리트가 長期에 걸쳐 強度를 發現하는 基本原理이다.

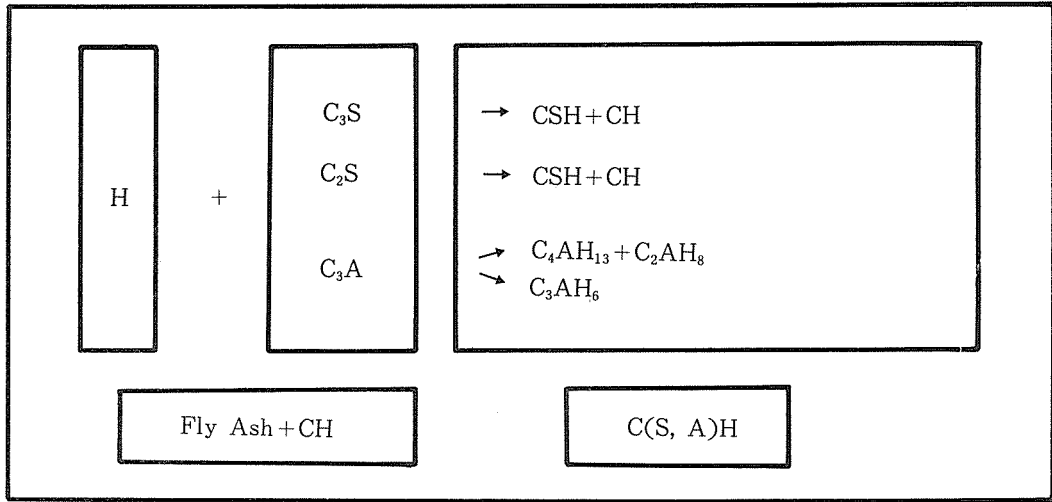
Fly Ash 콘크리트에 있어서 Fly Ash의 포졸란 反應은 Fly Ash의 種類나 品質에 따라 다르고, 또 그 反應은 普通 2~3個月부터 시작되기 때문에 콘크리트의 早期強度 確保가 매우 困難하다. 特히 早期材令에 있어서 設計基準強度를 확보해야만 하는 一般 構造用 콘크리트에 있어서 Fly Ash 콘크리트를 使用하기 위해서는 早期強度 確保를 위한 對策이 必要하다.

(2) 分級 Fly Ash의 使用

<표 4> Fly Ash 混合率 및 AE劑 種類에 따른 콘크리트 壓縮強度

Fly Ash 混合率 (%)	AE劑의 種類	AE劑 使用量 (%)	w _i (C+F) (%)	슬럼프 (cm)	空氣量 (%)	콘크리트 壓縮強度(kg/cm ²)		
						7 日	28 日	91 日
0	—	0	53.0	6.5	1.4	221(100)	337(100)	432(100)
	Vinsol Resin	0.007	46.7	6	5.2	238(112.8)	352(104.3)	421(97.6)
	Pozzoloth	0.15	47.1	5.5	5.5	237(112.5)	358(106.2)	431(99.8)
	特殊AE劑	0.05	48.2	5.5	5.2	218(102.4)	347(103.0)	411(95.2)
10	—	0	51.3	6.5	1.2	191(100)	334(100)	428(100)
	特殊AE劑	0.05	48.2	6	4.9	216(113.0)	336(100.6)	421(98.3)
20	—	0	51.3	6	0.9	183(100)	301(100)	394(100)
	Vinsol Resin	0.007	46.1	5	5.0	205(112.0)	298(99.1)	406(103.0)
	Pozzoloth	0.30	43.7	8	5.5	208(113.7)	319(106.0)	421(106.9)
	特殊 AE劑	0.05	48.9	6.5	5.0	154(84.2)	288(95.7)	378(96.0)
30	—	0	51.0	6.5	0.9	155(100)	240(100)	354(100)
	特殊AE劑	0.05	48.6	6.5	4.2	134(86.5)	222(92.6)	315(89.0)
40	—	0	51.5	7	0.8	144(100)	214(100)	324(100)
	特殊AE劑	0.05	49.0	6	4.2	123(85.4)	186(87.0)	294(90.6)

* Fly Ash의 種類: 強熱減量 1.71%, Blain 比表面의 3,350 cm²/g
G_{max} = 25mm, 單位시멘트 量 = 280~330 kg/m³, G/S = 1.70(重量比)



〈그림 4〉 Fly Ash 콘크리트의 수화

Fly Ash 콘크리트의 早期強度 增進을 위한 하나의 方案으로 “分級 Fly Ash”의 使用을 생각할 수 있다. “分級 Fly Ash”는 Fly Ash 固有의 特徵인 粒度特性 및 形狀特性에 着眼, 氣流分級으로부터 抽出된 微粒粉으로 콘크리트

品質 向上에 매우 效果的이다.

표 5~7 및 그림 5, 6에 氣流分級으로부터 얻은 “分級 Fly Ash”를 混合한 콘크리트의 配合條件 및 強度試驗 結果가 나타나 있다.⁴⁾

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 Fly Ash

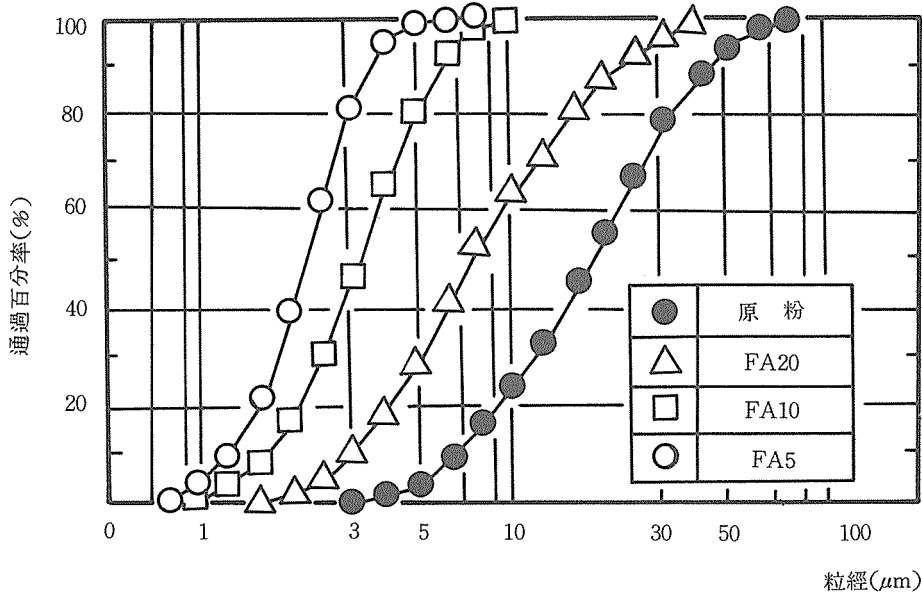
〈표 5〉 使用 材料

名 稱		主 要 物 性 值			備 考	
F L Y A S H	原 粉	比重 2.28	比表面積 3,550 cm ² /g	平均粒徑 7.6 μm	EP灰	
	FA 20	比重 2.31	比表面積 3,500 cm ² /g	平均粒徑 7.5 μm	EP灰	
	FA 10	比重 2.46	比表面積 3,450 cm ² /g	平均粒徑 3.3 μm	最大粒徑 10 μm 分級	
	FA 5	比重 2.51	比表面積 12,400 cm ² /g	平均粒徑 2.2 μm	最大粒徑 5 μm 分級	
시 멘 트		OPC, 比重 3.16, 比表面積 3,100 cm ² /g				
細 骨 材		表乾比重 2.58, 吸水率, 1.31%, 粗粒率 2.46			碎 砂	
粗 骨 材		表乾比重 2.60, 吸水率, 1.24%, 粗粒率 6.54			碎 石	

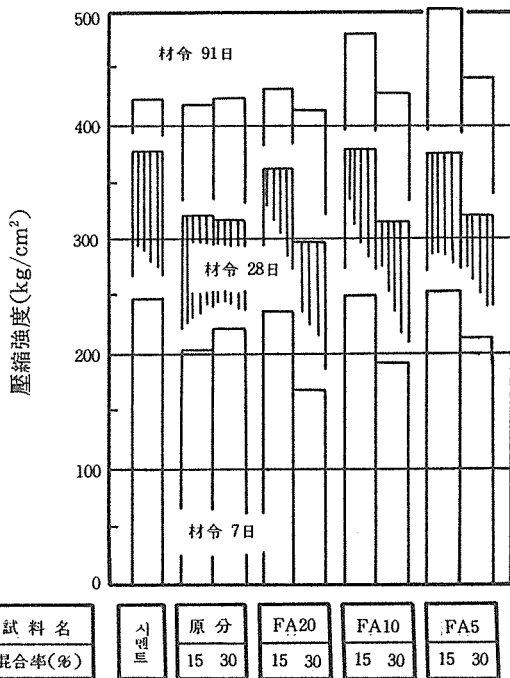
〈표 6〉 Fly Ash의 化學成分

(單位：%)

區 分	Ig. Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
原 粉	2.78	54.6	28.3	6.55	3.97	1.36	1.08	0.92	0.59
FA20	4.37	52.5	30.5	5.77	2.75	1.05	1.07	0.89	0.71
FA10	4.51	53.4	31.6	4.08	2.21	1.01	1.13	0.95	0.84
FA 5	5.54	53.8	29.5	4.52	2.03	0.93	0.99	0.81	1.24



〈그림 5〉 Fly Ash 粒徑分布



〈그림 6〉 壓縮強度 試驗結果

〈표 7〉 콘크리트의 配合條件

물-結合材比 $w/(c+f)$ (%)	細骨材率 s/a (%)	單位量(kg/m ³)	
		結合材	물
55	45	340	187

注) 結合材=시멘트+Fly Ash

콘크리트는 Non AE 콘크리트로 한다.

콘크리트의 早期材令 壓縮強度는 Fly Ash의 粉末度가 클수록 크고, 또, 混合率 15%에서는 Fly Ash를 혼합하지 않은 콘크리트와 거의 同等 以上이다. 즉, “分級 Fly Ash”를 使用하면 Fly Ash 콘크리트의 早期強度를 증진시킬 수 있고, 一般 構造物은 物論, 그 特徵을 살리면 特殊한 用途를 갖는 構造物에의 利用도 可能할 것으로 생각된다.

그러나, 現在 國內 각 石炭火力發電所에는 Fly Ash의 分級設備가 없기 때문에 “分級 Fly Ash”의 使用을 통한 Fly Ash 콘크리트의 早期強度 增進은 매우 어려운 實情이다.

(3) 早強用 混和劑의 使用
混和劑를 使用하여 콘크리트의 早期強度를

증진시키는 것은 過去부터 使用되고 있는 가장 實用的인 方法이다. 一般的으로 使用되는 早強用 混和劑는 減水劑 Type과 促進劑 Type을 들 수 있고, 前者는 單位水量的 減水效果로부터, 後者는 結合材의 凝結 및 硬化時間을 短縮시켜 콘크리트의 早期強度를 增進시킨다.

促進劑 Type의 混和劑는 칼슘이나 나트륨鹽化物, 硫酸鹽 등이 主成分이고 一般的으로 使用되고 있는 것은 鹽化칼슘이다. 鹽化칼슘은 經濟的이고 또, 凝結 및 硬化促進劑로서 優秀한 性能을 갖고 있지만, 鐵筋이나 鋼材의 發錆를 促進시키기 때문에 鐵筋콘크리트 構造物에 있어서는 特히 鹽化物 量에 注意하지 않으면 안된다.

減水劑 Type의 混和劑로는 減水劑, AE減水劑 및 高性能減水劑를 들 수 있고, Fly Ash 콘크리트의 早期強度 確保를 위해서는 特히 高性能減水劑의 使用이 效果的이고 가장 優秀한 方法이다. 왜냐하면, 이것은 Fly Ash의 混合率이 큰 境遇에도 早期強度 確保가 容易하기 때문이다. 그러나, 高性能減水劑는 그 使用量이 다른 減水劑에 비해 多量이기 때문에 經濟性的의 측면에서 약간의 問題點이 있다.

(4) Fly Ash 混合率 調整方法

Fly Ash 콘크리트의 早期強度 增進을 위한

또하나의 方案으로 Fly Ash 混合率 調整方法을 들 수 있다. 이것은 Fly Ash의 使用量을 그 代替量보다 약간 많게 하여 使用하는 方法으로 Fly Ash 콘크리트의 早期強度 증진에 매우 效果的인 方法이다.

표 8~10에 슬럼프(1.5±0.5cm, 7±1 cm, 20±1cm) 및 養生溫度에 따른 콘크리트의 配合 및 壓縮強度試驗 結果가 나타나 있다.⁵⁾

표 8~10에서 알 수 있는 바와 같이 普通시멘트의 20%(重量)을 Fly Ash로 代替하고, 또 增量으로서 5%(重量)를 混入한 것은 슬럼프 및 養生溫度에 關係없이 Fly Ash의 混合率 20%의 것보다 큰 強度值를 나타내고, 早期材令(28日 以下)에 있어서도 Fly Ash를 混合하지 않은 콘크리트보다 大部分 큰 強度值를 나타내고 있다.

3. 結 言

Fly Ash 콘크리트의 脆弱物性 改善을 위한 가장 基本的이고 經濟的인 方法은 良質의 Fly Ash를 使用하는 것이다. 그러나, Fly Ash의 品質은 燃燒條件이나 使用炭種의 多樣化에 따라 그 변동이 매우 심하고, 또 Fly Ash의 分級設備나 貯藏施設이 거의 되어 있지 않은 우리의

〈표 8〉 養生方法이 다른 콘크리트의 強度試驗(슬럼프 20±1cm)

Fly Ash 混合率 (%)	Slump (cm)	W/(C+F) (%)	콘크리트 1m ³ 當 使用量(kg)					備 考	
			C	F	W	S	G		
0	19.5	65.0	300	0	195	663	1,193	Gmax=25mm	
20	20.0	58.0	240	60	174	663	1,221	粗粒率: 모래 - 2.85	
25	19.0	52.1	240	75	164	663	1,227	자갈 - 7.00	

24時間 20°C 成型後 FA혼합율 (%) 材令(日)	壓縮強度 (kg/cm ²)									備 考
	20°C 水中養生			5°C 水中養生			20°C 7일 養生後 常溫 空中養生			
	0	20	25	0	20	25	0	20	25	
7	86	81	97	60	59	73	84	79	94	濕度: 79~72% 20°C水中: 20.1~19.8°C 5°C水中: 8.8~6.7°C 20°C空中: 21.7~15.1°C
28	173	160	169	124	119	121	175	264	269	
91	246	246	281	204	176	216	189	194	204	

〈표 9〉 養生方法이 다른 콘크리트의 強度試驗(슬럼프 7±1cm)

Fly Ash 混合率 (%)	Slump (cm)	W/(C+F) (%)	콘크리트 1 m ³ 當 使用量(kg)					備 考
			C	F	W	S	G	
0	8.0	60.0	300	0	180	828	1,078	Gmax=40mm
20	7.0	52.0	240	60	156	828	1,112	粗粒率: 모래 - 2.85
25	7.0	48.6	240	75	153	828	1,704	자갈 - 7.34

24時間 20°C 成型後 FA 혼합율 (%) 채령(日)	壓縮 強度 (kg/cm ²)									備 考
	20°C 水中養生			5°C 水中養生			20°C 7일 養生後 常溫 空中 養生			
	0	20	25	0	20	25	0	20	25	
7	126	121	142	83	90	104	142	121	138	濕度: 81~74% 20°C水中: 20.1~9°C 5°C水中: 7.6~6.2°C 20°C空中: 19.0~16.7°C
28	236	230	244	206	194	208	232	228	240	
91	300	308	354	258	263	285	251	237	285	

〈표 10〉 養生方法이 다른 콘크리트의 強度試驗(슬럼프 1.5±0.5cm)

Fly Ash 混合率 (%)	Slump (cm)	(C+F) (%)	콘크리트 1 m ³ 當 使用量(kg)					備 考
			C	F	W	S	G	
0	1.2	50	300	0	150	855	1,115	Gmax=40mm
20	1.7	44	240	60	133	855	1,130	粗粒率: 모래 - 2.85
25	1.4	40	240	75	126	855	1,135	자갈 - 7.35

24時間 20°C 成型後 FA 혼합율 (%) 채령(日)	壓縮 強度 (kg/cm ²)									備 考
	20°C 水中養生			5°C 水中養生			20°C 7일 養生後 常溫 空中 養生			
	0	20	25	0	20	25	0	20	25	
7	187	186	208	119	115	135	172	168	199	濕度: 77~75% 20°C水中: 20.1~20.0°C 5°C水中: 3.2~2.2°C 20°C空中: 20.1~12.6°C
28	299	297	333	221	232	235	264	278	279	
91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

現實에 비추어 보면 良質의 Fly Ash 使用은 매우 困難한 實情이다.

따라서, Fly Ash 콘크리트의 脆弱物性은 前述한 方法을 通하여 어느 程度 改善될 수 있고, 아울러 이들에 대한 持續的인 研究開發이 要望된다.

〈參 考 文 獻〉

1. 産業基地開發公社 試驗研究室, 플라이애쉬 콘크리트 研究報告書, 1985. 12
2. 徐政佑, 플라이애쉬를 混和材로 使用한 콘크리트의 實用化를 위한 研究, 1988. 7

3. 高野俊介, 柳川晃夫, フライアツシュコンクリート用特殊AE劑の試驗, セメント技術年報, X, 1956.
4. 石井光裕, 浮田和明, 重松俊一, 分級フライアツシュによるコンクリートの品質 向上 について, 土木學會 第42回年次 學術講演會, 昭和62年 9月
5. 渡邊辛三郎, 河村 協, フライアツシュを用いたコンクリート鋪裝
6. R. A. Lister, Fly Ash Characterisation and Monier Separation Technology, AshTech'84