

플라이애시를 대체한 超高强度 콘크리트의 施工性 및 工學的 特性에 관한 基礎的 研究

A Fundamental Study on the Workability and Engineering Properties of Super High Strength Concrete Replaced Cement As Fly ash

○ 柳 光 禹* 尹 炳 壽* 金 振 晚** 南 相 駟** 金 武 漢***
 Ryu, Kwang Woo Yoon, Byoung Soo Kim, Jin Man Nam, Sang Ill Kim, Moo Han

ABSTRACT

Recently, owing to efficiency of the concrete work and the rationalization of construction structures, concrete is required to be super high strength. Furthermore, it is take a growing interest in execution and manufacture for super high strength concrete.

This study is to investigate and analyze the influenced of flyash affecting on workability and engineering properties of super high strength concrete.

In this experiment, the 28day's compressive strength of concrete using 15mm size of aggregate and flyash is over 800kg/cm² in the 20%wt of water-cement ratio.

And the concrete using flyash have higher tensile strength than plain concrete.

1. 序論

최근 콘크리트공사의 능률과 건축구조물의 합리성을 도모하기 위한 超高强度 콘크리트의 수요가 증대되고 있고 그 製造 및 施工에 관한 관심이 高潮되고 있는 실정이다.

한편, 先進國의 경우 실제 施工 가능한 콘크리트의 압축강도 수준은 약 1300kg/cm²에 달하고 있으나 국내의 경우 선진국과는 많은 기술력의 차이를

보이고 있어 建設部門의 국제경쟁력 확보를 위한 초고강도콘크리트의 필요성이 대두되고 있다.

이에 본 연구는 높은 流動性과 分離抵抗性을 가진 超高强度 콘크리트를 제조하고, 과도한 단위시멘트량의 사용으로 인한 수화열의 상승 및 내구성 저하를 억제하기 위하여 시멘트량의 일부를 산업부산물인 플라이애시를 대체하여 사용하므로써 향후 건설구조의 개선과 합리성에 부응할 수 있는 超高

표 1. 실험 계획

물결합재비 (%/wt)	조골재크기 (mm)	목표슬럼프 (cm)	Flyash 대체율 (%/wt)	SP제 첨가율 (%)	아직 굳지않은 콘크리트의 시험											경화콘크리트의 시험			
					단위용적중량 (kg/l)	공기량 (%/v)	비빔온도 (°C)	다짐계수 (CF)	플로우 (cm)	슬럼프, 슬럼프플로우의 경시변화(분)						압축강도, 인장강도, 동탄성계수, 정탄성계수*, 초음파속도, 반발도	단위용적중량, 응력-변형도 곡선*		
										직후	15	30	45	60	90			120	
20	15 25	25±2	0 10	☆	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1주, 4주, 8주	* 정탄성계수, 응력-변형도 곡선은 재령 4주에서만 측정함

☆ SP제 첨가율은 슬럼프 23~27cm를 얻기위한 소정의 양으로 한다.

*正會員, 忠南大 大學院(碩士課程)

**正會員, 忠南大 大學院(博士課程)

***正會員, 忠南大 教授·工博

強度 콘크리트의 開發 및 實用化를 위한 그 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 實驗計劃 및 方法

2.1 實驗計劃

플라이애시를 대체한 超高强度 콘크리트의 아직 굳지 않은 상태의 施工性 및 경화상태에서의 공학적 특성을 비교 분석하기 위한 본 실험의 실험계획은 표1과 같이 물결합재비를 20(°/wt)로 하여, 粗骨材의 최대크기는 15mm, 25mm의 2 수준, 플라이애시의 대체율을 단위시멘트량의 중량비로서 0, 10(%)로 하여 超高强度콘크리트를 製造, 조골재크기 및 플라이애시 대체에 따른 超高强度콘크리트의 諸性質을 분석하였다.

아직굳지않은 콘크리트의 施工性을 알아보기 위한 측정항목은 슬럼프, 플로우, 슬럼프-플로우, 다짐계수, 비빔온도, 단위용적중량, 공기량을 측정하

표 2. 시멘트의 물리적 성질

시멘트의 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간(h:m)		안정성	압축강도 (kg/cm ²)		
			초 결	종 결		3일	7일	28일
보통 포틀랜드 시멘트	3.15	3,240	5:07	7:20	양호	194	216	323

표 3. 플라이애시의 물리·화학적 성질

주 성분 (%)						비 중
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Mn	
71.90	1.77	17.5	2.42	0.48	—	2.1

표 6. 콘크리트의 조합

물결합재비 (°/wt)	조골재크기 (mm)	플라이애시 대체율 (°/wt)	SP제첨가율 (%)	목표 슬럼프 (cm)	잔골재율 (°/vl)	단위수량 (kg/m ³)	절대용적 (l/m ³)			단위중량 (kg/m ³)				
							시멘트	플라이애시	모래	자갈	시멘트	플라이애시	모래	자갈
20	15	0	*	25±2	38	160	254	0	219	357	800	0	567	935
		229					38	219	357	720	80	567	935	
	25	0					254	0	219	357	800	0	567	953
		10					229	38	219	357	720	80	567	953

표 4. 골재의 물리적 성질

구분	입경 (mm)	조립율 (FM)	비중	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/l)	비 고
세골재	5	2.96	2.59	0.908	58.8	1.685	제염사 (남양산)
	15	6.61	2.62	1.07	56.8	1.49	캔자갈 (미사리산)
조골재	25	7.16	2.67	1.24	59.6	1.55	

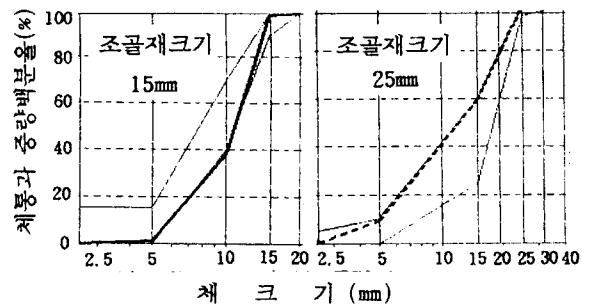
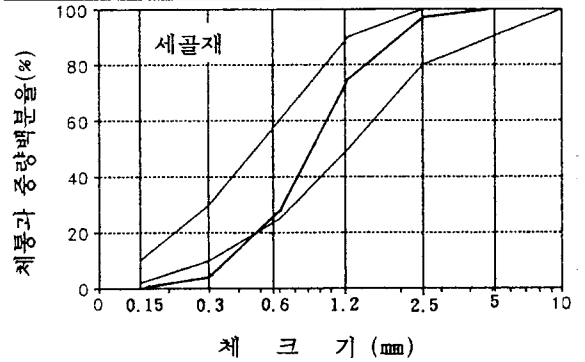


그림 1. 골재의 입도분포곡선

표 5. 혼화제의 물리적 성질

혼화제의 종류	유형	색상	주 성분	독성	PH	비중
고성능감수제	액상	흑색	Synthetic Polymers	무	—	1.10

였으며 슬럼프, 슬럼프-플로우는 경시에 따른 변화를 분석하였다.

경화상대에서는 압축강도, 인장강도, 동탄성계수, 단위용적중량, 초음파속도, 반발도를 재령 1, 4, 8(주)에서 측정하였으며 정탄성 계수 및 응력-변형도 측정은 재령 4주에서만 실시하였다.³⁾⁴⁾⁵⁾

2.2 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트로서 그 물리적 성질은 표2와 같고, 혼화材로 사용된 플라이애시의 물리·화학적 성질은 표3, 골재의 물리적 성질은 표4와 같고, 골재의 입도곡선은 그림 1과 같다. 또한 高性能減水劑의 물리적 성질은 표5와 같다.

2.3 콘크리트 調合, 공시체 제작 및 양생

본 실험에 사용한 콘크리트 조합은 물결합재비 20(°/wt)에 단위시멘트량을 800kg/m³을 적용하여 슬럼프값 25±2cm를 목표로 하여 수차의 시험비빔을 통해 가장 적절한 워커빌리티를 확보하고 所要의 압축강도 발현을 위한 콘크리트 調合을 선정, 표6과 같이 결정하였다. 콘크리트 비빔은 그림 2와 같이 100ℓ 강제식 믹서에 투입하여 6분30초 비빔으로 행하였고 SP제 투입은 一括投入法을 채택하였다.

공시체 제작은 콘크리트의 제조 후 압축강도 및 제물성 시험용은 φ10×20cm, 반발도용 공시체는 φ15×30cm의 실린더형 몰드를 KS에 준하여 製作하여 20±3℃의 수중에서 1, 4, 8(주)의 재령까지 양생하였으며 아직굳지않은 콘크리트 및 경화콘크리트의 각종 시험은 각 規準⁴⁾에 의하여 실시하였다.

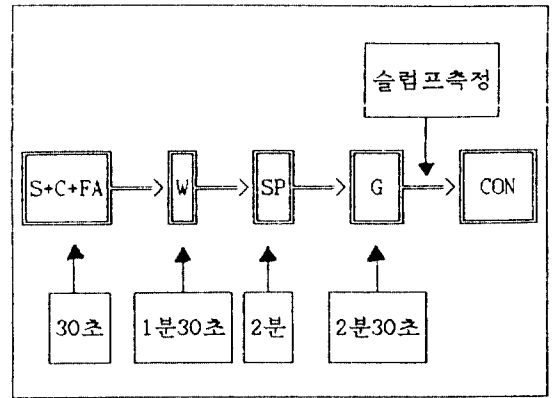


그림 2. 콘크리트의 비빔방법

3. 實驗結果 및 考察

3.1 아직 굳지 않은 콘크리트의 分析 및 檢討

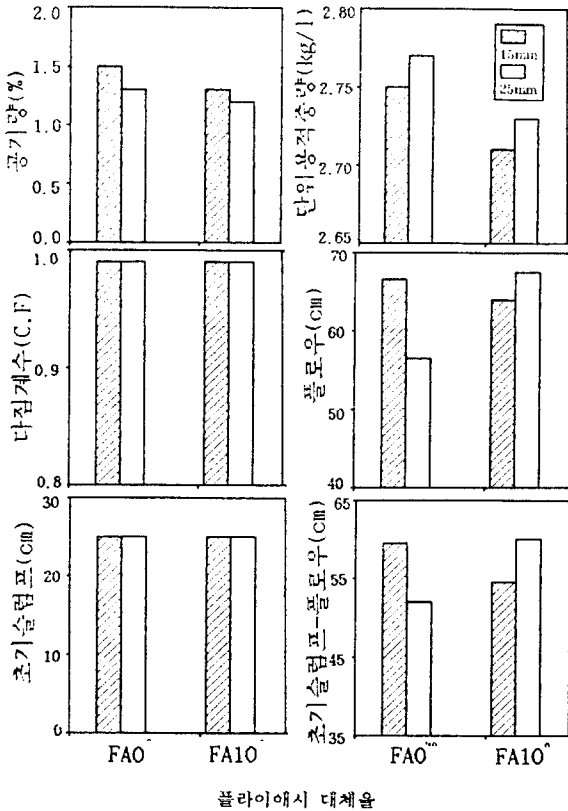
3.1.1 플라이애시 대체에 따른 공기량, 단위용적중량, 다짐계수, 플로우, 초기슬럼프 및 초기슬럼프플로우의 분석 및 검토

표 7은 아직굳지않은 콘크리트의 시험결과를 나타낸 것으로 플라이애시의 대체에 따른 공기량, 단위용적중량, 다짐계수 및 플로우의 變化를 나타낸 그림3에 의하면 공기량은 플라이애시대체에 관계없이 동일한 수준으로 나타났다.

조골재크기에 따른 단위용적중량의 변화는 조골재크기 25mm를 사용한 콘크리트가 15mm를 사용한 콘크리트 보다 전반적으로 높은 단위용적중량을 보이고 있고 플라이애시 콘크리트의 경우 플레인 콘크리트에 비해 다소 낮은 단위용적중량을 보이고 있는데 이는 조골재 및 플라이애시와 시멘트의 비중의 차이로 인한 결과로 사료된다.

표 7. 아직굳지않은 콘크리트의 시험결과

물결합재비 (°/wt)	조골재크기 (mm)	SP제 첨가율 (%)	FA 대체율 (°/wt)	비빔 온도 (℃)	공기 량 (%)	단위용 적중량 (kg/l)	다짐 계수 (CF)	플로우 (cm)	슬럼프의 경시변화(분) (cm)								슬럼프플로우의 경시변화(분) (cm)							
									직후	15	30	45	60	90	120	직후	15	30	45	60	90	120		
									20	15	3.5	0	28	1.5	2.75	0.99	66.5	25.0	25.0	25.0	24.8	24.8	24.0	22.1
4.5	10	29	1.3	2.71	0.99	64	25.0	25.0			25.0	25.0	25.0	24.2	24.1	54.5	54.0	53.5	53.5	52.5	49.5	46.5		
25	3.3	0	29	1.3	2.77	0.99	56.5	25.0		24.1	22.5	22.4	19.4	18.1	13.1	52.0	45.0	42.5	34.5	34.0	28.0	24.0		
	4.5	10	30	1.2	2.73	0.99	67.5	25.0		25.0	25.0	24.7	24.7	24.3	23.5	60.0	57.0	53.0	53.0	51.0	48.0	48.0		



플라이애시 대체율
 그림 3. 플라이애시 대체에 따른 공기량, 단위용적중량, 다짐계수, 플로우, 초기슬럼프 및 초기슬럼프-플로우의 변화

다짐계수치는 조합조건에 관계없이 0.99의 높은 수치를 보이고 있는데, 이는 초고강도콘크리트 영역의 流動性 평가척도로서 다짐계수에 의한 시험보다는 다양한 측정항목의 검토가 필요할 것으로 판

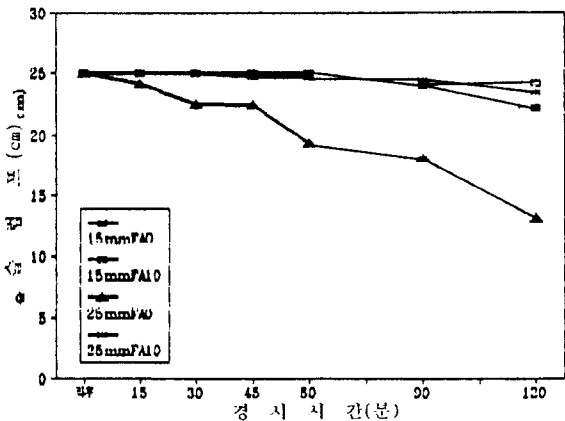


그림 4. 조골재크기 및 플라이애시 대체에 따른 슬럼프의 경시변화

단된다.

조골재크기 및 플라이애시 대체에 따른 초기슬럼프는 25cm로 나타나 목표슬럼프를 만족시키고 있고, 플로우는 56.5~67.5cm의 높은 수치를 보이고 있어 未硬化상태의 유동성에 양호한 결과를 나타내고 있고, 조골재크기 25mm의 플레인 콘크리트의 경우 상대적으로 낮은 플로우치를 보이고 있어 이는 다소 적은 SP제의 사용으로 인한 결과로 분석된다.

3.1.2 조골재크기 및 플라이애시 대체에 따른 슬럼프, 슬럼프-플로우의 경시변화의 분석 및 검토

조골재크기 및 플라이애시 代替에 따른 슬럼프로스의 변화는 토출 후 120분까지 거의 슬럼프로스가 발생하지 않는 경향을 보이고 있는데 이는 SP제의 다량첨가로 인한 결과로 사료되며 조골재크기 25mm의 플레인콘크리트의 경우 다소 적은 SP제 투입으로 상대적으로 미소한 감소를 보이고 있다.

한편, 콘크리트의 점성이 매우 강해 워커빌리티에 악영향을 미치므로 된비빔 콘크리트 領域에서의 다각적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

슬럼프-플로우치의 減少는 前述한 슬럼프의 경시변화와 유사한 경향을 보이고 있으며 플레인콘크리트에 비해 플라이애시콘크리트가 다소 완만한 감소를 보이고 있다.

한편, 플로우치 및 슬럼프-플로우치는 조합조건에 따라 변화를 보이고 있어 초고강도영역 콘크리트의 시공성판정에는 슬럼프보다 플로우 또는 슬럼프-플로우측정이 유리할 것으로 판단된다.

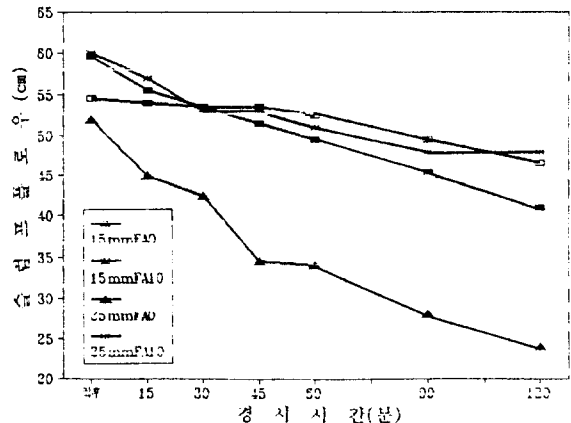


그림 5. 조골재크기 및 플라이애시 대체에 따른 슬럼프-플로우의 경시변화

표 8. 경화콘크리트의 시험결과

물결합재비 (%wt)	골재크기 (mm)	목표슬럼프 (cm)	FA의 대체율 (%wt)	SP제의 첨가율 (%)	재령 (주)	압축강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm ²)	동탄성계수 (×10 ⁵ kg/cm ²)	초음파속도 (km/sec)	단위용적중량 (kg/l)	반발도 (R.N)	정탄성계수 (×10 ⁵ kg/cm ²)	
20	15	25±2	0	3.5	1	649	36	4.21	4.55	3.84	31	3.48	
					4	764	39	4.44	4.56	3.85	35		
			10	4.5	1	613	35	4.19	4.62	3.80	33	3.41	
					4	802	48	4.41	4.63	3.84	36		
	25		0	3.3	1	4	607	35	4.26	4.63	3.90	30	3.78
							718	41	4.46	4.76	3.88	37	
			10	4.5	1	4	544	33	4.17	4.63	3.84	29	3.79
							666	48	4.44	4.69	3.84	38	

3.2 경화콘크리트의 分析 및 檢討

3.2.1 압축강도

표 8 및 그림 6에 의해 알 수 있는 바와같이 조골재크기 15mm를 사용한 경우 材齡 4주 압축강도가 764, 802(kg/cm²)로 동일조건외의 조골재크기 25mm를 사용한 경우 718, 666(kg/cm²)에 비해 46~136kg/cm²정도 높은 압축강도를 보여 조골재크기 15mm가 압축 강도 측면에서 유리하다고 판단된다.

재령에 따른 압축강도의 증진폭은 플레인콘크리트의 경우 111~115kg/cm², 플라이애시콘크리트는 122~189kg/cm²증진을 나타내고 있어 약간 높은 강도증진을 보이고 있다.

한편, 재령4주에 대한 재령1주 압축강도 발현율을 살펴보면 조골재크기 15mm 플라이애시콘크리트를 제외하고 82~85%의 백분율을 보여 보통콘크리트에 비해 조강화경향을 나타내고 있다.

표 9. 재령 4주 압축강도에 대한 재령 1주 압축강도 발현

물결합재비 (%wt)	조골재크기 (mm)	목표슬럼프 (cm)	FA의 대체율 (%wt)	SP제의 첨가율 (%)	백분율(% ¹⁾)		비교값(kg/cm ²) ²⁾	
					1주	4주	1주	4주
20	15	25±2	0	3.5	85	100	-115	0
					76	100	-189	0
	10		4.5	85	100	-111	0	
				82	100	-122	0	

1) $\frac{\text{재령1주 압축강도}}{\text{재령4주 압축강도}} \times 100$

2) 재령1주 압축강도 - 재령 4주 압축강도

트에 비해 조강화경향을 나타내고 있다.

3.2.2 인장강도

압축강도에 대한 인장강도의 比率을 나타낸 표10에 의하면 압축강도의 증진에 비해 인장강도의 증

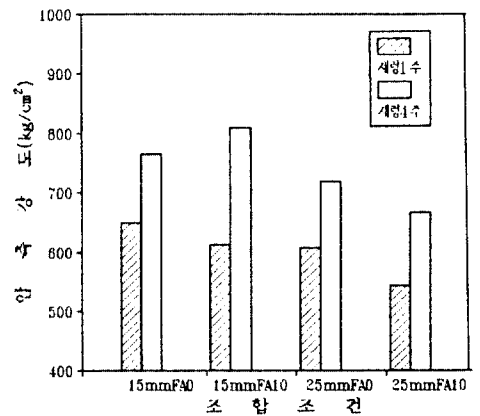


그림 6. 각 조합조건별 압축강도의 변화

표 10. 인장강도와 압축강도의 비율(σ_t/σ_c)

물결합재비 (%wt)	FA의 대체율 (%wt)	15mm골재 콘크리트		25mm골재 콘크리트	
		1주	4주	1주	4주
20	0	(1/18)	(1/19)	(1/17)	(1/18)
	10	(1/17)	(1/17)	(1/17)	(1/14)

진은 미소한 경향을 보이고 있으며 조골재의 크기 및 플라이애시 대체에 따라서 材齡이 경과함에 따라 인장강도의 增進幅은 조골재크기 15mm보다 25mm골재가 약간 上廻하는 값을 나타내고 있으며 플레인 콘크리트에 비해 플라이애시콘크리트가 높은 인장 강도발현을 보이고 있다.

3.2.3 동탄성계수, 초음파속도, 반발도

동탄성계수는 재령에 따라 일정한 증진을 보이고 있으며 조골재크기에 따라 25mm를 사용한 콘크리트가 15mm를 사용한 콘크리트보다 다소 높은 동탄성

계수치를 보이고 있는데 이는 조골재크기 25mm가 15mm보다 비중, 단위용적중량등이 양호했기 때문으로 사료된다. 플레인콘크리트에 비해 플라이애시 콘크리트는 재령에 따라 다소 높은 동탄성계수의 증進幅을 보이고 있다.

초음파속도는 조골재크기 15mm보다 25mm가 플라이애시 대체에 관계없이 다소 높은 초음파속도를 보이고 있는데 이는 조골재크기 25mm의 比表面積이 15mm보다 작은 것에 기인한다.

반발도는 재령의 증가에 따라 지속적으로 증가하고 있으며 조골재크기에 관계없이 유사한 경향으로 나타났다.

4. 結論

超高强度콘크리트의 施工性 및 工學的 特性에 미치는 조골재크기 및 플라이애시의 影響을 究明하기 위한 실험요인 및 수준을 설정하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 조골재크기 및 플라이애시 대체에 따른 슬럼프, 슬럼프플로우의 경시변화는 플라이애시 대체에 관계없이 토출 후 120분까지 거의 감소가 없어 유동성에 있어 매우 양호한 결과를 보여주고 있으나 점성이 강해 워커빌리티에 악영향을 미치므로 이에 대한 좀더 심도있는 연구가 필요하다고 판단된다.
- (2) 조골재크기 15mm를 사용한 경우 재령 4주 압축강도가 764, 802(kg/cm²)로 동일조건인 조골재크기 25mm를 사용한 경우 718, 666(kg/cm²)에 비해 46~136kg/cm²정도 높은 압축강도를 보여 조골재크기 15mm가 압축 강도 측면에서 유리하다고 판단된다.
- (3) 조골재의 크기 및 플라이애시대체에 따른 인장강도의 증進幅은 材齡이 경과함에 따라 조골재크기 15mm보다 25mm골재가 약간 上廻하는 값을 나타내고 있으며 플레인콘크리트에 비해 플라이애시콘크리트가 높은 인장강도발현을 보이고 있다.
- (4) 플로우치 및 슬럼프-플로우치는 조합조건에 따라 변화를 보이고 있어 초고강도영역 콘크리트의 시공성판정에는 슬럼프보다 플로우 또는 슬럼프-플로우측정이 유리할 것으로 판단된다.

- (5) 불결합재비 20(%wt)에서 재령4주 압축강도 800(kg/cm²)를 초과하는 강도를 발현하고 있어 본 실험결과 적절한 혼화재료의 사용으로 현장시공이 가능한 초고강도콘크리트의 제조가 가능함을 시사하고 있다.

參 考 文 獻

1. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete", ACI 226.19 7, 3R-87
2. Helmuth, R., "Fly Ash in Cement and Concrete", Portland Cement Association, 1987, pp. 203
3. A.M.Neville ; Properties of concrete, 3rd edition, 1981, pp.212~213.
4. 金武漢, 構造材料實驗方法論, 學文社, 1990.
5. 金武漢, 新制建築材料學, 文運堂, 1988, pp.117-209.
6. 日本建築學會, 高强度コンクリートの技術の現状, 丸善, 1991, 1