

플라이아시를 혼입한 재생골재콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 실험적 연구

- 제 2보, 경화 콘크리트의 성상을 중심으로 -

An Experimental Study on the Workability and Engineering Properties

of Recycled Aggregate Concrete Mixed Fly ash.

- Part 2, In the case of hardened concrete -

○ 남 상 일** 김 진 만** 최 희 용*** 김 무 한*

Nam, Sang Ill Kim, Jin Man Choi, Hee Yong Kim, Moo Han

ABSTRACT

In many countries, a considerable amount of demolition waste is generated and concrete forms a significant proportion of the waste.

The necessity for the use of recycled aggregate in concrete arises due to the following reasons : (1) diminishing supplies of natural aggregates; (2) securing ample supply of concrete aggregates to the construction industry; (3) diminishing dumping area within the urban limits; and (4) avoiding danger to marine life by limiting the indiscriminate dumping of highly alkaline nature of concrete in the sea.

It is the purpose of this report to improve the quality of recycled aggregate concrete and to put to practical use of such concrete.

1. 序論

도시의 재개발 및 환경정비에 의한 콘크리트 구조물의 해체과정에서 발생하는 폐기물을 콘크리트용 골재로서 재이용하는 것은 자원 및 에너지 절약, 폐기물의 투기에 의한 건축공해의 발생을 방지하는데 그 의의가 있다. 서구 및 일본의 경우에는 폐기콘크리트를 콘크리트용 골재로서 재사용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 재생골재 및 재생골재콘크리트의 시공지침안이 발간되어 실용화단계에 들어서고 있으나 아직 국내에서는 폐기 콘크리트의 개발 및 활용에 관한 연구가 이루어지고 있지 않은 실정이다.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

국내의 폐기 콘크리트의 발생량은 정확히 파악되어 있지는 않으나 약 400~500만³정도가 폐기콘크리트로 발생된다고 추정된다.⁵⁾ 그러나, 지금까지는 이러한 막대한량의 폐기콘크리트의 대부분을 매립 및 폐기함으로써 자원의 낭비 및 환경오염의 문제를 발생시켜 왔으나 금번 환

경처 및 건설부가 통합고시한 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에 따르면 폐기콘크리트의 25%이상을 의무재활용으로 정하고 있으며 점차 그 비율이 상향 조정될 예정으로 되어있어 폐기콘크리트의 재이용은 중요한 과제로 대두되고 있다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾

이에 본 연구는 재생골재콘크리트의 품질향상을 통하여 재생골재콘크리트의 사용에 따른 세반 문제점을 줄이고 재생골재를 유효하게 이용하기 위하여 '재생골재의 혼합조건에 따른 재생골재콘크리트의 시공성 및 공학적특성에 관한 실험적연구'⁹⁾에서 가장 양호한 물성을 보인 재생골재 대체율을 30, 50, 100(%) 대체한 재생골재콘크리트에 플라이아시를 각각 10, 20, 30(%) 혼입하여 재생골재콘크리트의 시공성 및 공학적 특성을 개선함과 아울러 재생골재와 플라이아시의 적절한 혼합조건을 구명하여 재생골재를 사용한 재생콘크리트의 실용화를 위한 참고자료를 제시한 것으로 아직까지 많은 콘크리트의 성상을 중심으로 고찰한 제 1보¹⁰⁾에 이어 제 2보로서 경화 콘크리트의 성상을 중심으로 고찰한 결과이다.

* 정희원, 충남대 교수, 공박

** 정희원, 충남대 대학원 (박사과정)

*** 정희원, 충남대 대학원 (석사과정)

2. 연구개요 및 연구방법

플라이애시를 혼입한 재생골재콘크리트의 시공성개선 및 공학적 특성을 비교 검토하기 위한 본 연구의 실험요인 및 수준은 표 1 과 같이 물결합재비는 40(%), 재생조골재의 대체율은 30, 50, 100(%) 로 하고 플라이애시의 혼입율은 10, 20, 30(%) 의 3종류로 하였다.

골재, 시멘트, 고성능감수제, 혼화재의 성질 및 콘크리트조합은 제1보와 동일한 조건으로 하였다.

표1. 실험요인 및 수준

요 인		수 준
물결합재비 (%)		40
플라이애시 혼입율 (%)		0, 10, 20, 30
재생조골재 대체율 (%)		30, 50, 100
목표 슬럼프 (cm)		18
측정항목	아직굳지않은 콘크리트시험	슬럼프, 플로우, 다짐계수, 단위용적중량, 비빔온도, 공기량, 불리당량
	경시변화(분)	직후, 15, 30, 45, 60, 90, 120
	경화콘크리트 시험	단위용적중량, 압축강도, 반발도, 동탄성계수, 정탄성계수, 초음파속도
	재령 (일)	7, 28, 60, 90, 180

3. 실험결과의 분석 및 검토

3.1 플라이애시와 재생조골재의 대체율에 따른 압축강도의 분석 및 검토

표 2는 플라이애시와 재생조골재의 혼합조건에 따른 경화 콘크리트의 각종 시험결과이다.

플라이애시의 대체율별 재생조골재의 대체율에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 그림 1 및 그림 2에서 알 수 있는 바와같이 재생조골재의 대체율에 무관하게 재령 7일에서는 플레인 콘크리트가 플라이애시를 사용한 콘크리트에 비하여 50-80kg/cm²정도 높은 강도 발현을 보이고 있으나 재령 28일 이후 플라이애시를 사용한 경우 계속적인 강도발현을 보이고 있어 오히려 플레인 콘크리트에 비하여 플라이애시 10, 20(%) 대체한 경우에는 재령 28일 이후부터, 플라이애시 30(%)를 혼입한 경우에는 재령 180일에서 높은 강도를 보이고 있는 것으로 나타났다. 이는 본 실험 조합의 단위시멘트량이 545kg/m³로 비교적

표2. 경화 콘크리트의 시험결과

물결합재비 (%)	40															
	30				50				100							
재생조골재의 대체율(%)	0			10			20			30						
플라이애시의 대체율(%)	0		10		20		30		0		10		20		30	
SP계 첨가율 (%)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3				
단위용적중량 (kg/l)	7일	2.36	2.40	2.37	2.35	2.35	2.37	2.35	2.32	2.30	2.34	2.31	2.29			
	28일	2.37	2.41	2.40	2.37	2.34	2.37	2.36	2.34	2.30	2.33	2.32	2.29			
	60일	2.37	2.39	2.38	2.36	2.35	2.38	2.37	2.34	2.32	2.33	2.33	2.30			
	90일	2.38	2.36	2.33	2.31	2.36	2.32	2.32	2.30	2.34	2.29	2.30	2.26			
	180일	2.37	2.35	2.34	2.32	2.36	2.34	2.32	2.29	2.30	2.29	2.26	2.27			
압축강도 (kg/cm ²)	7일	318	252	256	239	320	260	262	246	319	285	257	253			
	28일	343	264	263	118	321	266	256	328	312	402	388	350			
	60일	380	416	428	390	409	407	407	395	417	421	441	393			
	90일	404	424	430	413	401	449	449	439	422	465	466	421			
	180일	420	431	445	452	380	448	443	437	431	441	493	445			
동탄성계수 (x10 ³ kg/cm ²)	7일	3.25	3.31	3.16	2.98	3.34	3.31	3.15	3.01	3.31	3.23	3.07	3.01			
	28일	3.55	3.53	3.47	3.42	3.49	3.47	3.42	3.36	3.42	3.43	3.37	3.27			
	60일	3.67	3.63	3.58	3.48	3.59	3.63	3.56	3.45	3.56	3.51	3.48	3.38			
	90일	3.67	3.64	3.59	3.47	3.64	3.57	3.48	3.46	3.55	3.52	3.51	3.43			
	180일	3.67	3.71	3.59	3.52	3.63	3.72	3.52	3.51	3.54	3.61	3.48	3.46			
정탄성계수 (x10 ³ kg/cm ²)	7일	2.51	2.43	2.11	2.30	2.35	2.35	2.24	2.27	2.11	2.01	2.00	2.03			
	28일	2.91	2.67	2.79	2.76	2.49	2.51	2.38	2.27	2.54	2.30	2.45	2.61			
	60일	3.01	2.86	3.02	2.78	2.69	2.99	2.42	2.63	2.86	2.56	2.59	2.33			
	90일	3.10	2.86	2.92	2.81	2.78	3.02	2.71	3.07	3.08	2.92	2.69	3.29			
	180일	3.44	2.82	2.59	2.64	3.04	2.52	2.49	2.56	2.94	2.65	2.92	2.81			
초음파속도 (cm/sec)	7일	4.25	4.23	4.26	4.17	4.28	4.22	4.17	4.14	4.17	4.19	4.11	4.03			
	28일	4.35	4.44	4.43	4.33	4.38	4.42	4.33	4.30	4.28	4.32	4.36	4.28			
	60일	4.54	4.44	4.40	4.40	4.47	4.42	4.38	4.37	4.47	4.33	4.36	4.33			
	90일	4.65	4.51	4.47	4.39	4.56	4.47	4.42	4.38	4.56	4.46	4.38	4.34			
	180일	4.62	4.65	4.52	4.51	4.60	4.62	4.47	4.47	4.52	4.53	4.38	4.43			
반발도 (R.N)	7일	33	24	21	21	31	24	21	19	30	23	21	20			
	28일	35	28	31	29	35	31	30	29	33	29	30	28			
	60일	34	32	34	30	34	31	31	28	32	31	31	29			
	90일	36	33	34	32	35	30	32	32	34	30	32	29			
	180일	34	34	34	31	36	36	31	28	35	33	32	29			

많은 수준이므로 플레인 콘크리트의 경우 초기에 급격한 강도 발현을 보여 미세 구조학적으로 거친 결상을 형성하여 재령 28일 이후 강도 발현이 미약해졌으며, 반면, 플라이애시를 사용한 경우 수화반응이 서서히 이루어져 좀더 치밀한 결을 형성하고 28일 이후의 장기재령에서 포졸란 반응에 의한 강도 증진이 발생되었기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 그러나, 전반적으로는 표 3 및 그림 3에서 알 수 있는 바와같이 재령 28일 강도에 대한 60일 이후의 강도 증진율은 재생조골재 대체율 30(%) , 플라이애시 대체율 10(%)의 경우를 제외하면 10-40(%)의 증진을 보여 비교적 낮은 수준을 보이고 있고 특히 재령 180일에서 재령 90일 보다 낮은 강도를 보이고 있는 경우가 있는데 이는 재생조골재의 물성이 천연조골재에 비하여 열악하여 골재의 강도가 주로 콘크리트의 강도를 지배하게되는 장기재령에서의 골재요인의 영향인 것으로 사료된다.

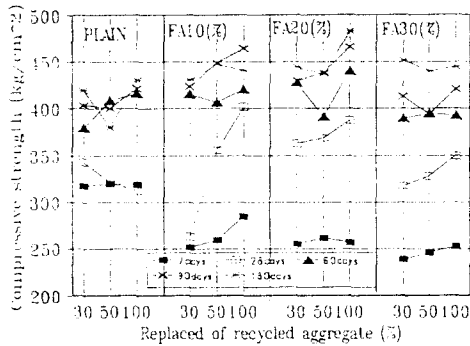


그림 1 재생조골재의 대체율 및 플라이애시 혼입율에 따른 압축강도의 변화

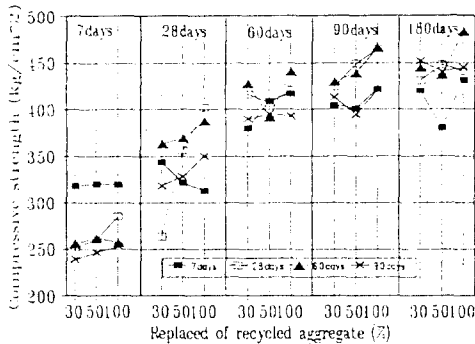


그림 2 재생조골재의 대체율 및 재령에 따른 압축강도의 변화

표 3. 재령 28일 압축강도에 대한 각 재령의 강도발현비율

재령 비	재생 골재 대체 율 (%)	플라이 애시 대체 율 (%)	SP재 첨가 율 (%)	비교치 (kg/cm ³)					백분율 (%)				
				7B 28E 60E 90E 180E					7E 28E 60E 90E 180E				
				7B	28E	60E	90E	180E	7E	28E	60E	90E	180E
30	0	0.0	-25	0	-37	-61	+77	93	100	111	118	122	
	10	0.0	-12	0	-152	-160	-167	95	100	158	161	163	
	20	0.1	-107	0	+65	+67	-82	71	100	118	118	123	
	30	0.2	-79	0	+72	+95	-134	75	100	123	130	142	
40	0	0.0	-1	0	-88	-80	+39	100	100	127	125	118	
	10	0.0	-96	0	-51	+93	-92	73	100	114	126	126	
	20	0.1	-94	0	-51	+93	+92	74	100	114	126	126	
	30	0.2	-82	0	+67	+111	+109	75	100	120	134	133	
100	0	0.0	+7	0	+105	+110	+119	102	100	134	135	138	
	10	0.0	-117	0	+19	+63	+39	71	100	105	116	110	
	20	0.2	-131	0	+53	-78	+95	66	100	114	120	124	
	30	0.3	-97	0	+43	+71	-95	72	100	112	120	127	

* 各材齡의 壓縮強度 - 材齡 28日 壓縮強度

** 各材齡 壓縮強度 / 材齡 28日 壓縮強度 × 100

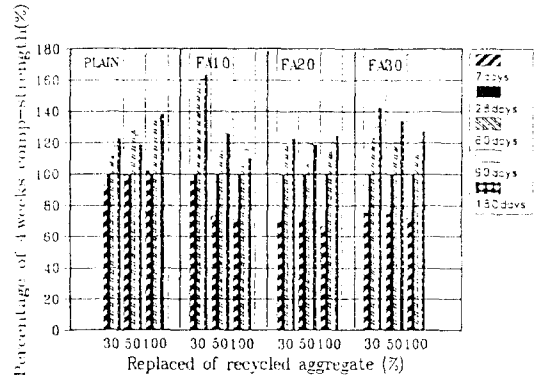


그림 3 재령 28일 압축강도에 대한 각 재령의 강도발현율

플라이애시 10(%), 20(%) 대체시에는 각 재령에서 재생조골재의 대체율의 증가에 따라서 강도가 약간 증가된 현상을 보이고 있지만 전반적으로 재생조골재의 대체율의 변화에 따른 강도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시의 대체율에 따라서는 재령 7일에서는 플라이애시 혼입율의 증가에 따라 강도가 낮아지고 있으나 28일 이후에는 플라이애시 혼입한 경우가 플레인 콘크리트에 비하여 높게 나타나고 있고 특히, 플라이애시 10, 20(%)에서 90일 이후의 강도가 플레인 콘크리트에 비하여 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에 의하면 재생조골재의 대체율에 무관하게 플라이애시의 대체율 10, 20(%)의 수준이 압축강도의 측면에서는 유리한 것으로 나타나고 있다.

3.2 플라이애시와 재생골재의 대체율에 따른 제공학적 특성의 분석 및 검토

그림 4는 재령 및 플라이애시의 대체율에 따른 동탄성계수의 변화를 나타낸 것으로 재령 60일까지는 증가하나 그 이후의 재령에는 거의 증진이 없는 것으로 나타나 재생조골재의 사용시 내구성 확보를 위한 대책이 요망됨을 알 수 있으며, 플라이애시의 대체율이 증가함에 따라서 동탄성계수가 저하하고 있는데 이는 플라이애시의 비중이 시멘트보다 낮아 플라이애시의 사용량이 증가할수록 단위용적중량이 감소되기 때문에 나타난 현상으로 사료된다.

그림 5는 압축강도와 동탄성계수의 관계를 나

타낸 것으로, 본실험의 결과는 고강도콘크리트를 대상으로 한 Lacroix-Jauguey의 식에 비해서는 5000-8000kg/cm²정도의 차이를 보이고 있으며 강도가 증가함에 따라 그 차이가 더 커지고 있는데 이는 본실험의 경우 재생골재를 사용하여 콘크리트의 단위용적중량이 작은 것에 기인한 것으로 생각된다.

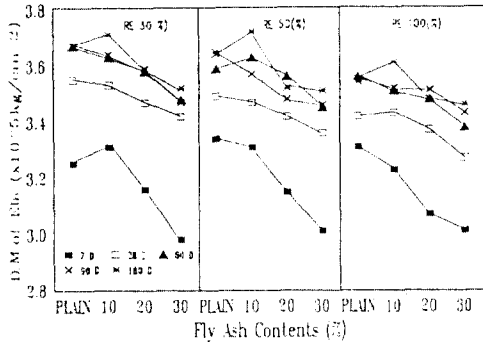


그림 4 플라이애시의 대체율에 따른 동탄성계수의 변화

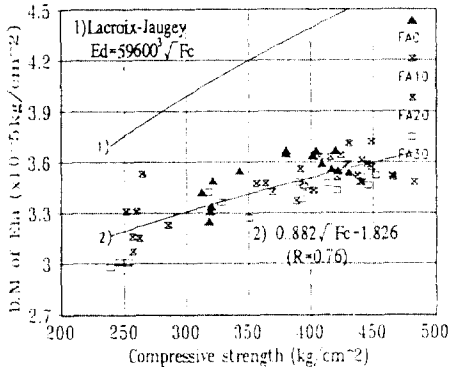


그림 5 압축강도와 동탄성계수의 관계

재생조골재의 대체율별 정탄성계수의 변화를 나타낸 그림 6에서 알 수 있는 바와같이 플레인 콘크리트는 재령의 증가에 따라서 계속적으로 정탄성계수가 증가하는 경향을 보이고 있으나 플라이애시를 대체한 경우에는 재령 60일 또는 90일 이후 정탄성계수가 저하하는 현상을 보이고 있으며 플라이애시의 대체율에 따라서는 유의할 만한 경향은 보이지 않고 있다.

압축강도와 정탄성계수의 관계를 나타낸 그림 7에서 알 수 있는 바와같이 본실험의 결과는 ACI규준식(고강도콘크리트)과 거의 동등한 수준의 탄성계수를 보이고 있다.

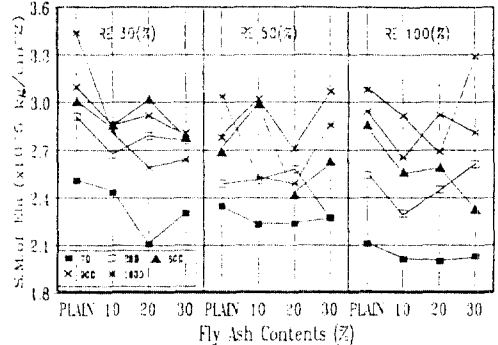


그림 6 플라이애시의 대체율에 따른 정탄성계수의 변화

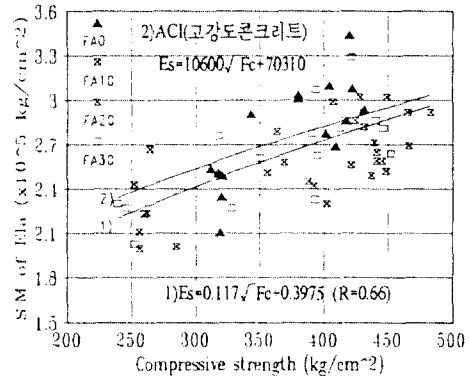


그림 7 압축강도와 정탄성계수의 관계

재생조골재의 대체율별 초음파속도의 변화는 그림 8에서 알 수 있는 바와같이 지속적인 증진을 보이지만 재생조골재 대체율 100(%) 플라이애시 혼입율30(%)의 경우 재령 28일 이후 거의 증진이 나타나지 않고 있다. 또한 재생조골재의 대체율의 증가에 따라서 낮은 초음파속도를 보이고 있다. 플라이애시의 증가에 의하여 압축강도가 약간 증가하는 경향을 보인것과 상반되게 이와같이 저하하는 현상은 재생조골재의 입형이 거칠어 불연속면을 증가시키고 또한 재생조골재의 주변에 고착된 구 모르타분이 속도를 저하시켰기 때문으로 사료된다.

플라이애시의 사용량의 증가에 따라서는 초음파속도가 저하하고 있는데 이는 플라이애시의 입자가 반응하지 않은채로 남아있어 발생한 현상으로 사료되나 여기에 관하여는 미세구조학적으로 좀더 심도 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다. 초음파속도와 압축강도를 나타낸 그림 9와 같다.

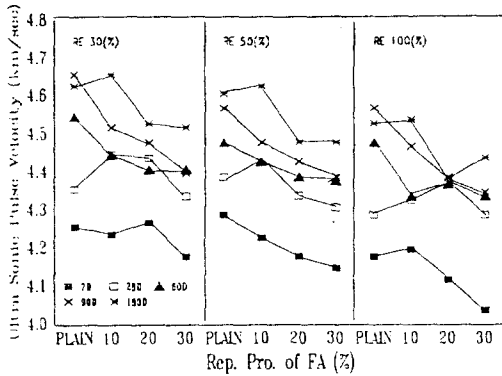


그림 8 플라이애시 대체율에 따른 초음파속도의 변화

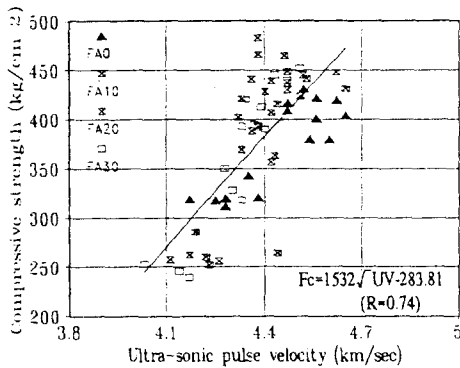


그림 9 초음파속도와 압축강도의 변화

반발도는 그림 10에서 알 수 있듯이 압축강도가 약간씩 증진된 것과는 달리 재령 28일 이후 거의 증진이 이루어지지 않고 있으며 특이한 것은 플레인 콘크리트의 경우 재령 7일에서 높은 반발도를 보였으나 그 이후 거의 증진이 없는 것으로 나타났다. 플라이애시를 혼입한 경우에는 7일에서 플레인 콘크리트보다 6~12정도 낮은 반발도를 보였고, 28일 이후 상당히 증진하였지만 플레인 콘크리트보다 낮은 수준을 유지하고 있으며, 플라이애시의 대체율의 증가에 따라서 반발도치는 저하하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 플라이애시의 사용에 의하여 표면의 경도가 저하하였기 때문에 발생한 현상으로 사료되며 반발도에 의한 압축강도 추정시 플라이애시를 사용한 경우에는 수정된 식을 사용하여야 할 것으로 사료된다.

반발도와 압축강도의 변화를 나타낸 그림 11에서 알 수 있는 바와같이 반발도 19~24, 28

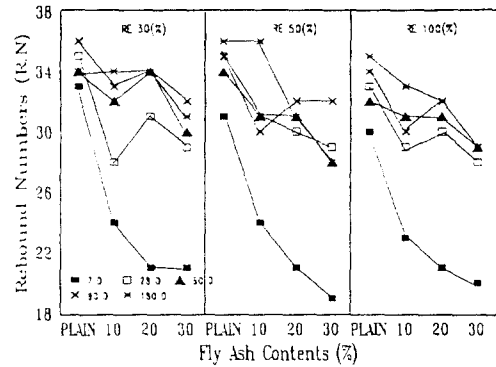


그림 10 플라이애시의 대체율에 따른 반발도의 변화

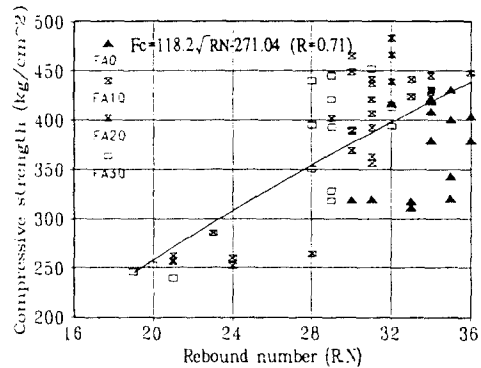


그림 11 반발도와 압축강도의 변화

~36의 범위에 반발도가 집중하는 현상을 보이고 이 범위내에서 동일 반발도에서 압축강도가 크게는 200kg/cm²까지 변화되는 값을 보여 반발도에 의한 비파괴 시험법의 오차가 큰 것으로 본 실험에서는 나타났다

4. 結論

플라이애시를 혼입한 재생골재콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 본 실험의 결과 중 경화 콘크리트의 공학적 특성을 중심으로 고찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 재생조골재의 대체율에 무관하게 플라이애시를 대체한 콘크리트의 초기 재령에서는 플레인 콘크리트보다 낮은 강도를 보이나 그 이후 지속적인 강도발현을 보이며 재령 28일

이후에는 오히려 높은 강도를 나타내고 있어 재생골재콘크리트에서는 플라이애시 20(%)까지 강도 증진에 유리한 것으로 나타났다.

2. 본 실험 조합중 플라이애시 10(%)를 혼입한 경우 플레인콘크리트에 비하여 콘시스턴스가 크게 저하하지 않고 또한 압축강도는 28일 이후 더 높게 발현하고 있어 아직굳지않은 콘크리트의 시공성 및 경화콘크리트의 강도 특성을 고려할때 재생골재콘크리트에서 플라이애시의 대체율은 시멘트 중량에 대하여 10(%)가 가장 적절한 것으로 나타났으며 경화 콘크리트의 압축강도가 중요시되는 경우에는 플라이애시를 20%까지 대체하여 사용 하여도 될 것으로 사료된다.
3. 탄성계수는 본 실험의 경우 기존 문헌의 자료와 비교할때 비중이 낮은 재생골재를 사용 함으로써 콘크리트의 단위용적이 저하하였기 때문에 동탄성계수는 매우 낮은 값을 보였으나 정탄성계수는 기존의 자료와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
4. 반발도에 의한 압축강도 추정시에서는 동일 반발도에서 압축강도치의 변화가 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 竹島宏祐, 콘크리트廢棄物を用いた再生骨材及び再生콘크리트, 第8回콘크리트工學年次講演會論文集, 1986, pp.861-864
2. 福土勳ほか, 再生骨材を用いた콘크리트의 性質, 세멘트콘크리트, No.480(1987.2), pp.10-19
3. Torben C. Hansen and Soren E. Hedeg rd, Properties of Recycled Aggregate Concretes as Affected by Admixtures in Original Concretes, ACI JOURNAL, V.81, No.1, Jan.-Feb. 1984, pp.21-26
4. ALAN D. BUCK, Recycled Concrete as a Source of Aggregate, ACI JOURNAL, V.74, NO.5, MAY 1977, pp.212-219
5. 金武漢, 국내 廢棄콘크리트 發生量의 豫測 및 再生骨材로의 利用展望에 관한 研究(건축 부문 폐기콘크리트를 중심으로), 大韓建築學會 學術發表大會, 제13권, 제2호, 1993.4.
6. 奥平聖, 콘크리트塊とリサイクル, 세멘

- 트콘크리트, No.550(1992.12), pp.1-8
7. 笠井芳夫, 加賀秀治, 콘크리트破碎物の再 利用その1 콘크리트破碎骨材의 性状, 세멘트콘크리트, No.347(1976.1)
8. 河野廣隆, 再生骨材を用いた콘크리트의 特性 とその利用, 세멘트콘크리트, No.490 (1987.11), pp.23-30
9. 金武漢, 再生骨材의 混合조건에 따른 再生骨 材콘크리트의 施工性 및 工學的 特性에 관한 實驗的 研究, 大韓建築學會 論文集, 제9권 세 11호, 1993.11.
10. 金武漢, 플라이애시를 混入한 再生骨材콘크 리트의 施工性 및 工學的 特性에 관한 實驗 的 研究(제 1보, 아직굳지않은 콘크리트의 성상을 중심으로), 大韓建築學會 論文集 제 10권 제2호, 1994.2.
11. 日本建築學會建設廢棄物處理再利用委員會, 再 生骨材および再生콘크리트의 使用規準(案), 콘크리트工學, VOL.16, No.7, 1978, pp.42-46
12. Japanese Architectural standard specification for reinforced concrete work JASS 5 T-402, AIJ, 1993, pp 123-130
13. 金武漢: 構造 材料 實驗 方法論, 學文社, 1992. PP 194 - 270
14. 日本建設省, 建設事業への 廢棄物利用技術の 開發, pp91-95, 1986.11
15. Kashino Norimoto, 廢棄物の 建築用콘크리트 への再利用, 콘크리트工學, Vol.25, No.5, 1987.5.