



재생 골재 콘크리트의 슬럼프 손실 개선을 위한 분말형 감수제의 활용

양근혁^{1)*} · 심재일¹⁾ · 이재삼²⁾ · 정헌수³⁾

¹⁾목포대학교 건축공학전공, ²⁾두산산업개발 RC연구개발팀, ³⁾중앙대학교 건축공학과

Application of Powdered Superplasticizer to Improve of Slump Loss Rate in Recycled Aggregate Concrete

Keun-Hyeok Yang^{1)*}, Jae-II Sim¹⁾, Jae-Sam Lee²⁾, and Heon-Soo Chung³⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Mokpo University, Chonnam 534-729, Korea

²⁾Dept. of RC Research & Development, Doosan Industrial Development Co., Ltd., Seoul 137-062, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

ABSTRACT In this study, powered superplasticizer (PSP) agents to improve the slump loss rate of recycled aggregate concrete were developed. To evaluate the variation of fluidity against elapsed time and the mechanical properties, twenty four specimens whose main variables had the mixing condition of aggregates, such as natural and recycled gravels, and natural and recycled fine aggregates, were tested. The concrete slump with a liquid superplasticizer greatly decreased against the elapsed time and dropped by less than 50% of initial slump after two hours. However the concrete slump with the PSP agents hardly varied until after half an hour and maintained more than 85% of initial slump even after an hour. Also the PSP agents made the compressive, splitting tensile, and flexural strength of concrete increased and the shrinkage strain decreased. Considering the properties improvement of concrete, it can be recommended that optimum mixing amount of the PSP agents should be 5% of the amount of cement.

Keywords powered superplasticizer, recycled aggregate, slump loss, mechanical property, shrinkage

1. 서 론

재생 골재 콘크리트의 경시변화는 재생 골재의 높은 흡수율로 인해 보통 콘크리트에 비하여 1.5배¹⁾ 정도 크며, 재생골재 치환율의 증가와 함께 현저한 경시변화를 보인다. 재생 골재 콘크리트의 초기 슬럼프는 감수제의 사용에 의하여 시공성을 확보할 수 있다. 하지만 콘크리트의 배합 후 현장타설까지의 시간은 30분~60분을 고려하면 재생 골재 콘크리트의 현장 시공성은 매우 천연 골재를 사용한 보통 콘크리트에 비해 현저히 떨어질 수 있다. 뿐만 아니라 현장에서 레미콘에 감수제를 직접 투입하는 것은 감수제의 최적량을 제어할 수 없어 콘크리트의 재료분리로 인한 품질저하의 원인²⁾이 될 수 있다.

시간경과에 따른 콘크리트의 슬럼프 손실을 개선하는 방법으로는 초기 높은 유동성, 지연제의 사용, 슬래그와 같은 혼화제의 사용 및 감수제 투입시기의 조절 등^{3,4)}을 들 수 있다. 보통 콘크리트에서는 이들 방법들에 대한 연구들이 지속적으로 진행되면서 경시변화 개선을 위한

자료들이 축적되었다. 하지만 재생 골재의 높은 흡수율을 고려할 때 이들 방법을 재생 골재 콘크리트에 적용하기 위해서는 배합설계부터 많은 보완이 요구된다^{5,6)}.

재생 골재 콘크리트에서 배합 초기 투입된 감수제가 시간의 경과와 함께 그 능력을 발휘할 수 있다면 품질 확보와 함께 경시변화 개선에 많은 도움이 될 것이다. 보통 콘크리트에서 현장 시공성을 확보하기 위한 고성능 감수제의 투입은 배합 후 30분임이 김무한 등⁴⁾에 의해 제시되고 있다. 하지만 배합 후 30분 경과 시점에서 정확히 감수제 양을 조절하고 투입하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 감수제 투입 양에 따른 슬럼프의 조절도 어려울 뿐만 아니라 비전문가에 의해 감수제의 투입조절이 이루어져야 하기 때문이다.

본 연구에서는 재생골재 콘크리트의 현장 적용성에 심각한 문제가 될 수 있는 경시변화를 개선하기 위하여 분말형의 혼화제를 개발하였다. 이 혼화제는 지연제 개념이 아니라 시간의 경과에 따라 감수제의 효과가 발휘될 수 있는 성능을 부여하였다. 슬럼프 손실이 특히 큰 재생 골재 콘크리트에서 혼화제의 효율성을 평가하기 위하여 재생 굵은골재와 재생 잔골재들의 혼입조건을 변화시켰다. 이들 혼화제가 투입된 재생 골재 콘크리트의 유동

*Corresponding author E-mail : yangkh@mokpo.ac.kr

Received April 5, 2006, Accepted August 31, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

성 및 역학적 성능들이 검토되었고 최적의 사용량이 제시되었다.

2. 분말형 혼화제의 개발

2.1 PSP (powered superplasticizer)제의 개발

경시변화 개선을 위해서 가장 중요한 사항은 감수제의 투입시기와 감수제의 효과가 나타나기 시작하는 시간이다. 감수제의 효과는 투입 후 15~30분까지 어느 정도의 유동성을 확보해 준다. 그러나 레미콘 공장에서는 콘크리트의 품질확보를 위해 일반적으로 배합과 동시에 감수제를 투입한다. 이들 배합초기에 투입된 감수제의 현장 적용에 대한 효과를 높이기 위해서는 감수제의 유동성 개선효과가 투입 후 서서히 반응하여 오랜 시간동안 지속되어야 한다.

본 연구에서는 시간의 경과와 함께 감수제가 용해되면서 유동성을 확보할 수 있는 점에 기초하여 분말형의 혼화제를 개발하였다. 일반적으로 국외에서 수입되는 분말형의 감수제는 액상형의 감수제를 응고하여 분말형으로 가공한 것으로서 감수효과가 크지 않아 현장에서 거의 사용되지 않고 있는 실정이다. 이를 개선하기 위하여 유동성 증진에 유리한 고로슬래그와 감수제를 이용하여 새로운 분말형 혼화제(이하 PSP 제)를 개발하였다.

Fig. 1에는 PSP 제의 제조흐름도를 간략히 나타내었다. PSP제 제조는 고로슬래그와 고성능 감수제를 일정한 비

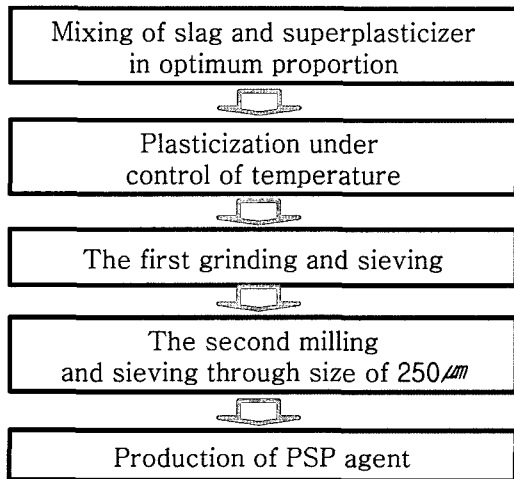


Fig. 1 A basic process for development of PSP agent

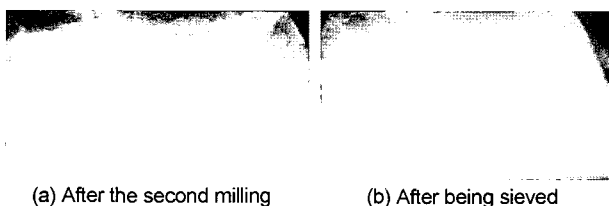


Fig. 2 Features of PSP agent

율로 배합하여 소성과정을 거친 후 미분말을 만드는 과정을 거쳤다. 최적의 배합비율과 소성온도 및 시간을 평가하기 위하여 많은 예비실험을 수행하였다. 이들 예비실험으로부터 최적의 PSP 제조방법이 평가되었다. Fig. 2에는 최종적으로 개발된 PSP제를 나타내었다. PSP제에서 폴리카르본산계 감수제를 사용한 경우에는 PSP-P로 나프탈렌계 감수제를 사용한 경우에는 PSP-N으로 구분하였다.

2.2 PSP 제의 물리적 성질

Table 1에는 PSP 제의 화학적 성분에 대한 XRF 실험 결과를, Fig. 3에는 PSP 제의 입도분포 결과를 각각 나타내었다. PSP 제의 주요성분은 고로슬래그로서 이들의 화학적 조성은 고로슬래그와 거의 동일하였지만 칼슘과 규석성분이 증가하고 망간과 니켈 성분들이 추가되었다. 평균 입경은 $8\mu\text{m}$ 로서 시멘트의 입경인 $10\mu\text{m}^{\text{D}}_{50}$ 와 비슷한 수준이었다. 비중은 고로슬래그와 비슷한 2.93이며, 비표면적은 $6,100 \pm 200\text{cm}^2/\text{g}$ 이었다. 재료의 표면 색깔은 폴리카르본산계와 혼합된 경우에는 흰색을, 나프탈렌계와 혼합된 경우에는 연한 갈색을 나타내었다.

Table 1 Chemical ingredient of PSP agent and slag (unit : % in mass)

Ingredient	PSP-P	PSP-N	Slag
MgO	3.88	3.58	3.8
Al ₂ O ₃	13.7	14.2	13.7
SiO ₂	33.7	34.4	31.5
SO ₃	0.34	0.5	0.3
K ₂ O	0.55	0.557	0.4
CaO	46.69	45.6	43.9
TiO ₂	0.573	0.532	0.56
MnO	0.195	0.187	-
Fe ₂ O ₃	0.304	0.262	0.3
NiO	-	0.051	-
Ig. loss	0.068	0.131	5.54

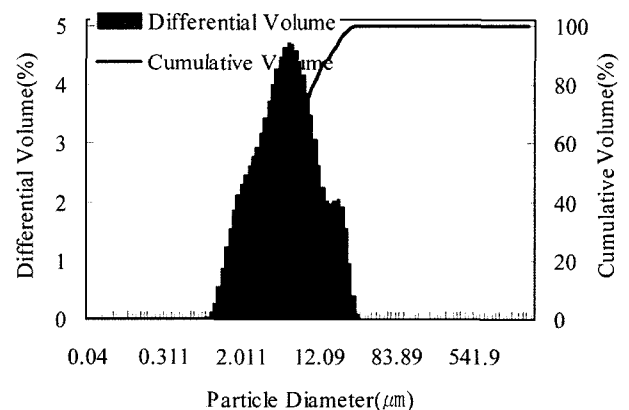


Fig. 3 Particle distribution of PSP agent

3. 배합설계

3.1 배합 시험체

주요 변수는 재생 굵은·잔골재 등급과 PSP제의 혼입률이다. 재생 골재의 등급은 KS F 2573에 따라 평가되었다. 재생 굵은골재는 구조용인 1등급과 3등급을, 재생 잔골재는 2등급을 이용하였다. 재생 굵은골재 및 잔골재 치환율은 기존 연구 결과들^{1,8)}에서 제시되었듯이 100% 치환되었을 때 경시변화가 가장 심하므로 100%로 고정하였다. 이들 재생 굵은골재와 잔골재의 배합조건을 주요 변수로 PSP제를 혼입하였다. PSP제는 폴리카르보산계 고성능 감수제를 이용하여 만든 PSP-P와 나프탈렌계 고성능 감수제를 이용하여 만든 PSP-N 두 종류로 구분하였다. 혼입률은 PSP-P(5%), PSP-P(7.5%), PSP-N(5%)로 하였다. 일반적으로 혼화제는 시멘트 양 대비 5.0% 이하를 의미하지만 본 연구에서는 PSP제의 최적의 혼입률을 평가하기 위하여 7.5%까지 첨가하였다. PSP제의 혼입률인 시멘트 양 대비 5.0~7.5%는 PSP제의 제조에서 첨가된 고성능 감수제의 전체 양 및 배합 시 전체 양에 미치는 영향을 최소화하기 위해 결정된 것이다. PSP제의 제조에서 고성능 감수제의 혼합량은 매우 소량이다. 즉 PSP제의 혼입률 5%는 고성능 감수제만으로 환산하였을 때 0.5% 미만의 양이다. 따라서 PSP제는 고성능 감수제만을 사용한 경우에 비하여 환경적, 경제적인 이점도 있다. Table 2에는 배합 시험체의 주요 변수를 나타내었다. 이들 변수에 따라 24 배합이 실험되었다.

재령 28일의 압축강도는 천연 굵은·잔골재를 사용하였을 때 30 MPa를 목표로 하였다. 모든 배합에서 물-시멘트비(W/C), 잔골재율 (S/a), 및 단위수량 (W)은 일정하게 하였다. 이들은 각각 50%, 42% 및 175 kgf/m^3 이었다. PSP제 무첨가 콘크리트에서는 목표 슬럼프 200 mm

에 대하여 폴리카르보산계 고성능 감수제를 직접 투입하였다. 각 재료의 배합중량 산정 시 PSP제의 혼입률을 함께 적용하였다.

3.2 골재의 물리적 성질

천연 잔골재와 굵은골재는 레미콘 배합에서 이용되고 있는 전남 무안산의 천연 해사와 쇄석을 각각 이용하였다. 재생골재는 C사에서 임팩트 크러셔에 의해 파쇄되고 에어 분류기 및 습식분급기에 의해 불순물과 골재 표면에 부착된 미분말이 제거된 것들을 이용하였다. C사의 재생골재 생산시스템에서 골재의 품질은 습식분급 회수에 의해 결정되었다. 굵은골재는 최대직경 25 mm를 사용하였으며, 잔골재는 직경 5 mm와 2.5 mm의 체가름을 통해 입도를 조절하였다. Table 3에는 사용된 골재들의 물리적 성질을 나타내었다.

3.3 배합 및 측정 방법

배합은 자동으로 시간조절이 되는 300l 용량의 강제식 믹서기를 이용하였다. 배합방법은 굵은골재와 잔골재를 투입하여 1분간 비빈 후 시멘트를 투입하여 다시 1분을 비볐다. 물을 투입하여 90초간 비빈 후 최종적으로 경시변화 개선을 위해 PSP제를 투입하여 180초간 비볐다. 굳지 않은 콘크리트의 유동성 시험은 KS F 2402⁹⁾에 따른 슬럼프 및 슬럼프 플로우 시험에 의해 평가되었다. 시간경과에 따른 슬럼프 손실률을 평가하기 위해 배합 후 즉시, 30, 60, 90, 120분에서 각각 슬럼프와 슬럼프 플로우를 측정하였다.

PSP제가 경화된 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 강도 및 건조수축 특성을 평가하였다. 콘크리트의 압축강도와 인장강도는 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ 의 몰드를 이용하여 재령 3, 7, 28, 56, 91일에서 평가되었다. 단 PSP-N 계열 시험체의 압축강도와 인장강도는 재령 28일에서만 측정되었다. 휨 강도는 $150 \times 150 \times 530 \text{ mm}$ 크기의 공시체를 이용하여 재령 28일에서 KS F 2408⁸⁾에 따라 평가하였다. 응력-변형률 관계 및 정탄성계수는 재령 28일에서 고강도용 컴프레서미터 및 W.S.G를 이용하여 측정되었다. 건조수축 변형률은 $\Phi 150 \times 300 \text{ mm}$ 몰드에 W.S.G (WFLM 60-11)를 매립하여 측정하였다. 건조수축 시험은 재령 14일간 평균 20°C의 수조에서 양생 한 후 항온항습실에서

Table 2 Main variables and basic condition for test

Main variables	Recycled gravel : grade 1, 3
	Recycled fine aggregate : grade 2
	PSP agent : Series I : None Series II : PSP-P (5%) Series III : PSP-P (7.5%) Series IV : PSP-N (5%)
Basic condition	$W/C = 50\%$, $S/a = 42\%$, $W = 175 \text{ kgf/m}^3$

Table 3 Physical properties of aggregates

Type		Maximum size (mm)	Density (g/cm^3)	Water absorption (%)	F.M	Unit weight (kg/m^3)	
Gravel	Natural	25	2.48	1.93	6.52	1,642	
	Recycled		1	2.53	1.6	6.62	1,704
			3	2.4	6.24	6.89	1,645
Fine aggregate	Natural	5	2.53	1.62	2.79	1,455	
	Recycled		2	2.36	5.37	3.25	1,366

초기 2일까지는 20분 간격으로 그 후에는 매 1시간 간격으로 TDS 303을 이용하여 자동측정, 저장하였다. 항온항습실은 온도 20°C, 상대습도 60%로 일정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

Table 4에는 각 배합의 실험 결과를 나타내었다. 각 시리즈의 시험체 명에서 첫 번째 문자와 두 번째 숫자는 각각 굵은골재 종류와 등급을, 세 번째 문자는 잔골재 종류를 나타낸다. G는 천연 굵은골재를, R는 재생 굵은골재를, s는 천연 잔골재를, r은 재생 잔골재를 각각 나타낸다. 예를 들어 R1-r은 재생 굵은골재 1등급 100%와 재생잔골재 2등급 100%가 이용된 배합이다. 탄성계수 (E_c)는 응력-변형률의 곡선에서 원점과 최대강도의 45%를 연결하는 직선의 기울기에 의해 산정하였다¹⁰⁾.

4.1 초기 유동성

Fig. 4에는 골재 종류 및 등급의 배합조건과 초기 슬럼프 (SL_0)의 관계를 나타내었다. PSP 제가 사용되지 않은 Series I은 목표슬럼프에 대해 고성능 감수제가 조절되었는데 이때 투입된 감수제는 0.8~1.4% 범위에 있었다. 재생

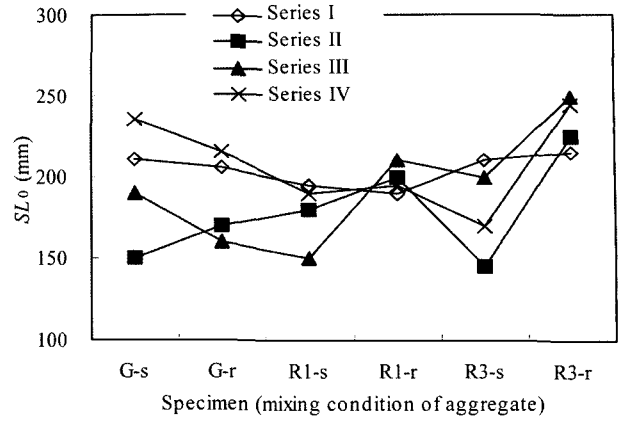


Fig. 4 Initial slump against mixing condition of aggregates

잔골재를 사용한 콘크리트에서는 미립분들의 함유에 의해 초기 유동성이 낮았다. PSP제가 치환된 콘크리트의 초기 슬럼프는 액상형 폴리카르본산계가 첨가된 경우 (Series I)에 비해 최대 20% 정도 낮았지만 150 mm 이상의 슬럼프를 유지하였다. PSP 제의 양이 초기 슬럼프에 미치는 영향은 크지 않았지만 PSP-P제 보다는 PSP-N제가 초기 유동성 향상에 유리하였다. 이는 PSP 제조 시 고성능 감수제의 투입 비의 차이로서 폴리카르본산계에 비해 나프탈렌계 감수제의 혼입비율이 높기 때문이라 판단된다.

Table 4 Detail of test results

Series	Specimen	SL , mm					$SL-F$, mm					f_{ck} , MPa					f_r , MPa	f_t , MPa	E_c , MPa
		Min.					Min.					Days							
		0	30	60	90	120	0	30	60	90	120	3	7	28	56	91	28 d	28 d	28 d
Series I	G-s	230	205	195	180	145	583	508	430	360	315	17.1	30.7	47.8	49.8	59.3	4.46	3.16	37,581
	G-r	210	185	150	135	110	438	388	283	293	169	14.5	24.4	38.6	41.8	43.2	3.88	2.45	30,104
	R1-s	185	155	140	130	115	415	363	260	280	240	15.3	28.4	42.3	42.3	49.6	3.71	2.53	31,855
	R1-r	190	165	145	110	95	400	374	360	249	219	11.9	21.7	31.9	31.8	37.2	3.22	2.46	22,834
	R3-s	220	190	165	140	125	483	417	341	288	272	14.1	26.9	37.5	37.9	43.6	3.98	2.68	26,445
	R3-r	225	160	135	105	75	418	350	275	235	208	11.4	21.2	32.8	33.1	40.7	2.96	2.23	22,006
Series II	G-s	150	145	140	140	135	233	238	242	283	270	18.3	30.5	48.5	51.5	62.5	4.60	3.25	38,928
	G-r	170	200	195	160	120	415	400	380	325	320	13.6	23.0	35.1	39.4	45.6	3.76	2.56	30,034
	R1-s	180	170	145	150	135	390	370	338	290	275	14.5	27.5	41.8	43.5	52.6	3.93	2.66	31,763
	R1-r	200	195	190	180	170	440	485	418	388	355	12.3	22.3	30.7	31.5	37.3	3.724	2.34	25,812
	R3-s	145	180	175	150	120	335	333	273	230	233	13.9	27.4	36.9	39.2	45.1	3.98	2.56	29,401
	R3-r	225	205	190	150	130	415	330	315	303	284	11.2	20.6	32.0	31.6	40.9	3.14	2.25	22,930
Series III	G-s	190	185	180	165	165	380	383	355	356	348	16.7	30.6	50.4	49.8	63.3	4.69	3.33	34,592
	G-r	160	155	155	130	115	365	345	305	260	245	12.4	24.5	36.4	37.1	46.2	4.29	2.92	28,244
	R1-s	150	140	130	125	110	225	231	254	244	231	15.5	29.6	45.8	46.9	58.1	4.14	3.00	35,307
	R1-r	210	210	185	155	145	398	378	350	337	258	11.7	24.0	34.9	35.1	41.7	3.81	2.82	26,268
	R3-s	200	185	180	170	160	385	358	336	320	273	13.5	28.5	37.1	38.7	47.0	3.99	2.59	26,218
	R3-r	250	225	210	180	165	585	547	455	360	295	10.8	22.5	30.1	30.4	37.4	3.14	2.30	20,867
Series IV	G-s	235	215	210	205	195	555	488	465	464	399	-	-	51.7	-	-	-	3.12	36,241
	G-r	215	195	180	165	150	420	380	376	309	263	-	-	33.9	-	-	-	2.42	26,529
	R1-s	190	182	170	155	150	330	313	305	268	286	-	-	57.1	-	-	-	2.89	36,932
	R1-r	195	210	170	150	135	393	380	355	266	254	-	-	39.4	-	-	-	2.55	24,630
	R3-s	170	160	150	135	130	283	271	243	254	275	-	-	42.3	-	-	-	2.67	27,549
	R3-r	245	235	210	185	165	610	555	482	396	356	-	-	35.1	-	-	-	2.01	20,272

4.2 시간경과에 따른 슬럼프 변화

Fig. 5에는 시간경과에 따른 슬럼프의 변화를 나타내었다. Fig. 5 (a)는 재생 굵은골재 1등급과 재생 잔골재 2등급을, Fig. 5 (b)는 재생 굵은골재 3등급과 재생 잔골재 2등급이 사용된 콘크리트이다. 세로축은 상대 슬럼프로서 시간 경과에 따른 슬럼프(SL)를 초기 슬럼프(SL_0)로 무차원화 하였다. 고성능 감수제를 투입한 콘크리트의 슬럼프는 시간경과와 함께 급격히 감소하며 120분 후에는 초기 슬럼프의 50% 이하로 떨어졌다. 하지만 PSP 제를 혼합한 콘크리트의 슬럼프는 배합 후 30분까지는 거의 변화가 없으며 1시간 경과 후에도 초기 슬럼프의 85% 이상을 유지하였다. 특히 Table 4에도 나타내었듯이 재생 굵은골재와 천연 잔골재를 사용한 배합에서는 배합 후 1시간까지는 초기 슬럼프 이상으로 있었다. 슬럼프 플로우도 슬럼프와 동일한 경향을 보였다. 이들의 효과는 Fig. 6에

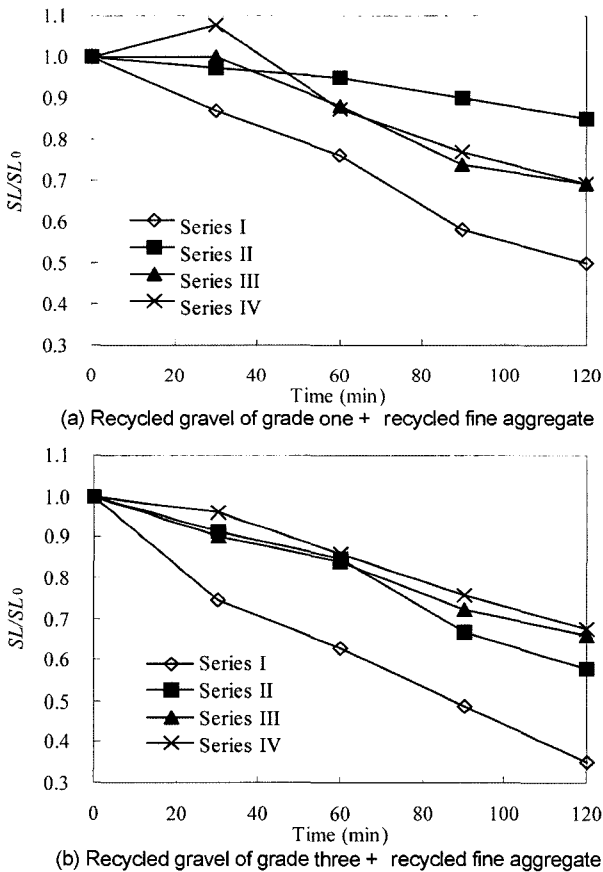


Fig. 5 Relative slump against elapsed time

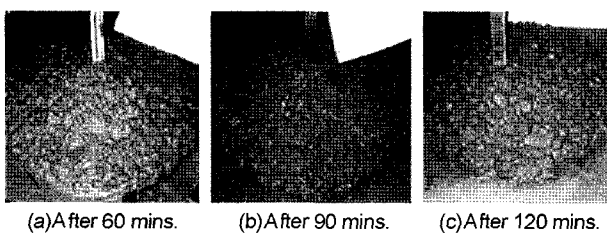


Fig. 6 Slump state after two hours (R3-r in Series 3)

나타낸 series 3의 R3-r 시험체의 시간경과에 따른 슬럼프 상태 변화에서도 잘 보여주고 있다.

Figs. 5 및 6은 PSP제 개발단계에서 중점을 두었던 고성능 감수제의 효과가 시간의 경과와 함께 발휘되고 있음을 보여준다. 일반적으로 콘크리트 응결경화 지연제는 주요 성분이 인산염으로서 경화를 지연시킴으로서 슬럼프 손실을 방지한다. 하지만 PSP제는 Table 1에 나타낸 바와 같이 알루미늄계 성분들이 고로슬래그에 비해 약간 증가된 화학적 조성으로서 물과의 1차 반응을 통하여 PSP제 표면의 감수제 성분이 초기 유동성을 확보하고 시간 경과와 함께 슬래그와 결합된 감수제의 알루미늄계 성분들의 성능발휘에 의해 배합 후 30분~60분 후에도 슬럼프 손실을 방지할 수 있었다.

4.3 슬럼프 손실 기울기

Fig. 5에서 시간의 증가에 따른 슬럼프 변화는 거의 직선적이다. 따라서 슬럼프 변화는 근사적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{SL}{SL_0} = kT + 1 \quad (1)$$

여기서 T 는 경과시간(분)이며, k 는 슬럼프 손실의 기울기이다.

Fig. 7에는 골재의 배합조건에 따른 선형회귀 분석에 의해 결정된 슬럼프 및 슬럼프 플로우 손실 기울기인 k 의

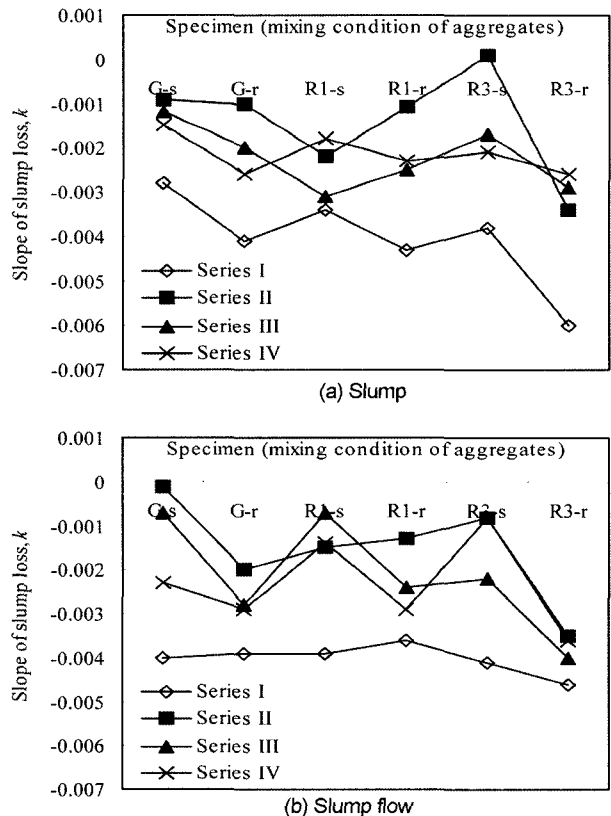


Fig. 7 Slope of slump loss against mixing condition

변화를 나타내었다. 슬럼프 손실 기율기는 PSP제가 첨가하지 않은 재생골재 3등급의 콘크리트에서 특히 컸다. 하지만 PSP제를 5.0% 첨가하였을 경우 재생골재 종류 및 등급에 관계없이 슬럼프 손실 기율기는 2배 이상 개선되었다. 하지만 PSP 제의 혼입률이 7.5%에서는 5.0%에 비하여 슬럼프 손실 기율기가 약간 낮았다. PSP제 제조에 이용된 고성능 감수제는 나프탈렌계보다는 폴리카르본산계가 우수하였다.

본 연구에서 개발된 PSP제는 콘크리트의 경시변화 개선에 효율적이며 특히 슬럼프 손실률이 큰 재생골재 콘크리트에서 배합 후 1시간 이후의 유동성을 매우 향상시켰다. PSP-P제가 PSP-N제에 비해 효능이 우수하였다.

4.4 압축강도

Fig. 8에는 PSP제가 골재 배합조건과 재령 28일 압축강도의 관계에 미치는 영향을 나타내었다. 일반적으로 천연 골재보다 재생 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도가 평균 70~85% 낮았다. 특히 재생 굵은골재보다는 재생 잔골재가 사용된 R1-r 및 R3-r 시험체의 압축강도가 현저히 낮았다. PSP제가 투입된 콘크리트의 압축강도는 액상형 폴리카르본산계가 투입된 Seires 의 동일 콘크리트와 같거나 평균 10% 높았다.

재령에 따른 강도 발현율의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 강도 발현율은 28일 압축강도에 대한 상대압축강도를 나타낸다. PSP-P제를 혼입한 콘크리트의 재령 3일 압축강도 발현율은 액상형 폴리카르본산계를 투입한 콘크리트에 비해 평균 2.5% 낮았다. 하지만 7일 이후의 강도 발현은 비슷한 수준이며 56일 이후의 강도 발현율은 평균 7% 증가하였다. 이는 PSP제의 주요성분인 고로슬래그가 장기강도 증진에 기여하기 때문이다. PSP제는 재생골재 콘크리트의 압축강도 발현에 전혀 무해한 영향을 미쳤으며 오히려 장기강도 증진에 유리하였다.

4.5 할렬인장강도, 휨강도 및 탄성계수

콘크리트의 역학적 특성 중 할렬인장강도 (f_t), 휨강도

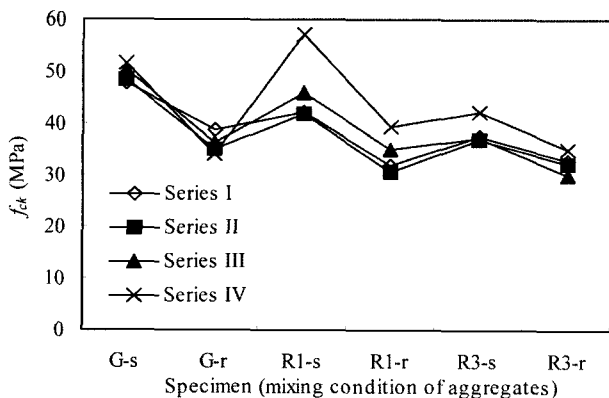


Fig. 8 Compressive strength against mixing condition

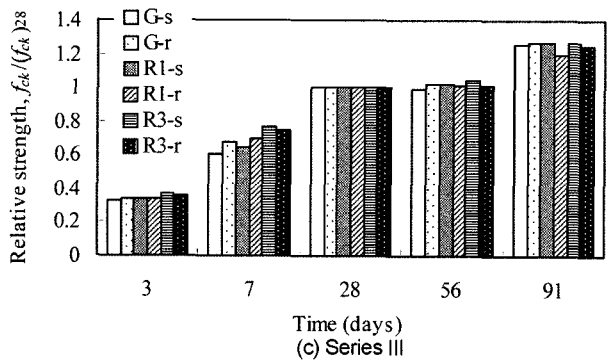
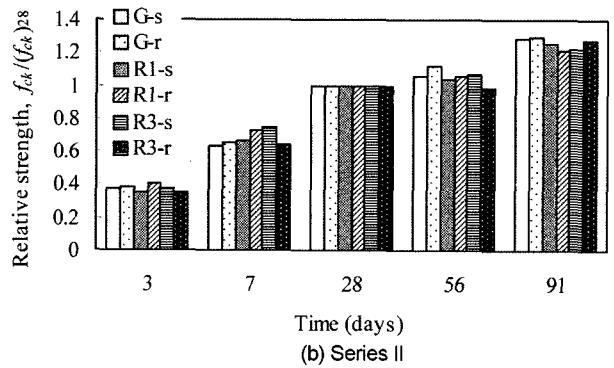
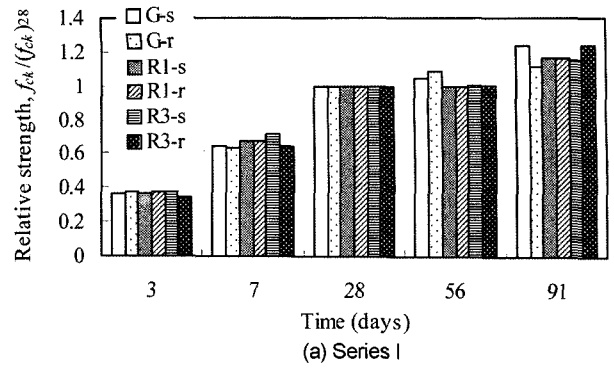


Fig. 9 Strength development against elapsed time

(f_t) 및 탄성계수 (E_c)는 주로 콘크리트 압축강도($\sqrt{f_{ck}}$)의 제곱근^{2,10)}에 비례하여 나타낸다. Table 3에는 이들 역학적 특성들에 대한 실험결과를 자세히 나타내었으며 Fig. 10에는 PSP제가 혼입된 콘크리트에서 재생 골재 배합조건에 따라 재령 28일에서 콘크리트 압축강도의 루트승에 대한 각 역학적 특성의 변화를 나타내었다. PSP제가 혼입된 콘크리트의 할렬인장강도비($f_t / \sqrt{f_{ck}}$)는 액상형의 폴리카르본산계가 투입된 콘크리트에 비해 평균 15% 높았다. 하지만 재생 굵은골재 3등급 또는 재생 잔골재가 사용된 시험체(R1-r, R3-s, R3-r)들에서 PSP제가 혼입된 경우의 $f_t / \sqrt{f_{ck}}$ 는 액상형의 폴리카르본산계가 투입된 콘크리트와 비슷한 수준이었다.

PSP제가 콘크리트의 휨강도비 ($f_t / \sqrt{f_{ck}}$) 및 탄성계수비 ($E_c / \sqrt{f_{ck}}$)에 미치는 영향은 매우 우수하였다. ACI 318-05¹⁰⁾에서는 휨강도비와 탄성계수비를 각각 $0.63 \sqrt{f_{ck}}$ 와 $4700 \sqrt{f_{ck}}$ 로 제시하고 있다. 액상형의 폴리카르본산계가 투입된 재생 골재 콘크리트에서는 이들 ACI 기준에서 제시하는 값보다 낮았다. 하지만 PSP제는 콘크리트의 휨

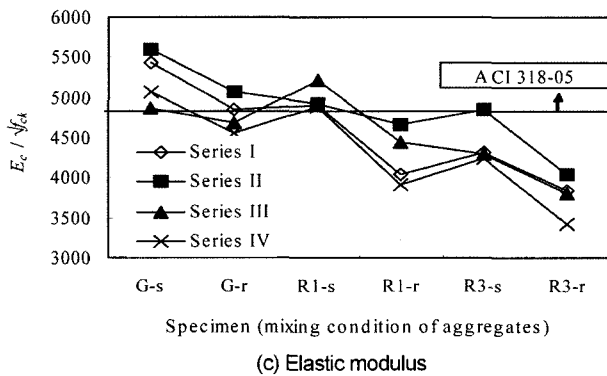
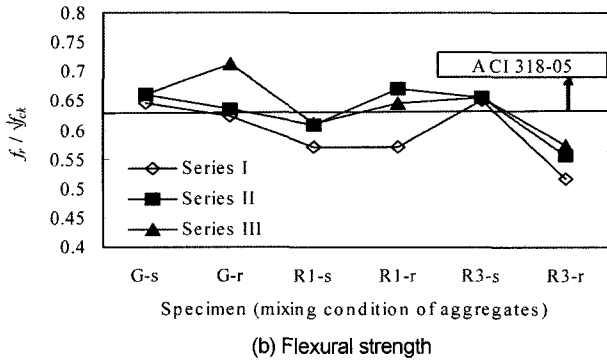
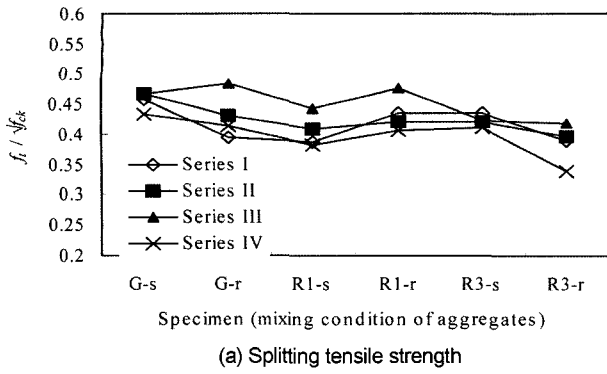


Fig. 10 Mechanical properties against mixing condition

강도와 탄성계수 상승에 기여하였다. PSP제가 혼입된 경우 R3-r 시험체를 제외한 모든 시험체의 $f_r / \sqrt{f_{ck}}$ 를 ACI 기준값 이상으로 상승시켰으며 $E_c / \sqrt{f_{ck}}$ 도 액상형의 폴리카르보산계가 투입된 재생골재 콘크리트에 비해 현저히 상승하였다.

4.6 건조수축 변형률

Fig. 11에는 PSP제의 혼입여부에 따른 건조수축 변형률의 변화를 나타내었다. Fig. 11 (a)는 천연 굵은골재와 천연 잔골재를, Fig. 11 (b)는 재생 굵은골재 1등급과 재생 잔골재를, Fig. 11 (c)는 재생 굵은골재 3등급과 재생 잔골재를 각각 사용한 경우이다. 재생 골재가 사용된 콘크리트의 건조수축은 기존 연구 결과들^{4,8,11)}에서와 같이 천연골재만 사용한 경우에 비해 건조수축 변형률이 증가하였다. PSP제는 골재 종류에 관계없이 콘크리트의 건조수축을 약간 감소시키지만 그 효과는 작았다. 초기 재령 10일까지는 PSP제의 혼입여부에 관계없이 대부분의 콘

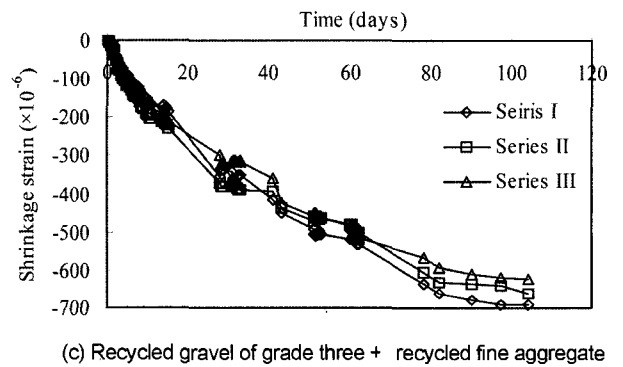
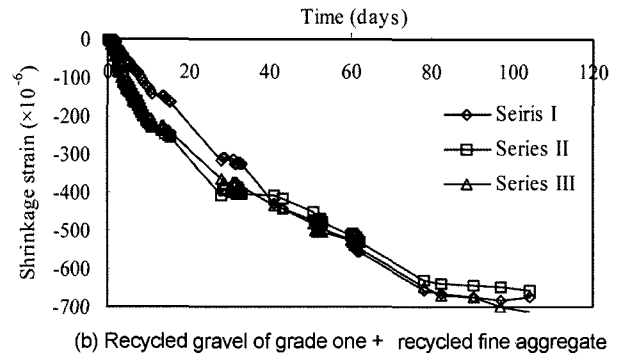
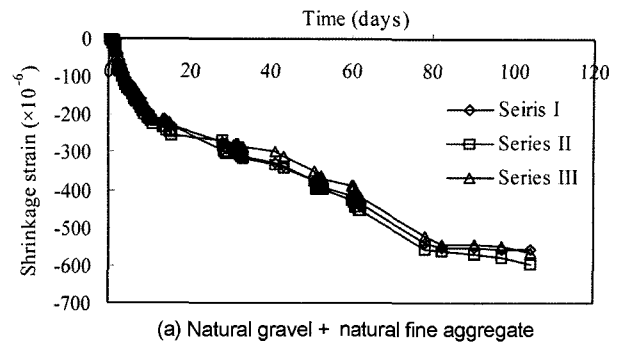


Fig. 11 Shrinkage strain against elapsed time

크리트 건조수축 변형률은 200μ 범위에 있었다. 시간경과와 함께 PSP 제의 혼입여부에 따라 건조수축 변형률의 차이를 보이는데 재생골재 콘크리트의 재령 90일에서는 $600 \sim 700 \mu$ 범위였다. PSP제는 콘크리트의 건조수축 변형률을 약 5~15% 감소시키는 효과를 보였다.

이상에서 보여준 바와 같이 PSP 제의 혼입은 재생 골재 콘크리트의 역학적 성능을 향상시켰다. 사용된 PSP 제의 주요성분은 Table 1에 나타낸 바와 같이 고로슬래그와 거의 동일하며 분말도는 $6,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 급으로서 시멘트에 비해 매우 높다. 일반적으로 고로슬래그는 콘크리트의 역학적 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 비표면적이 클수록 수화생성 반응에 효과적이다. 이맹호 등¹²⁾은 OPC 모르타르에서 고로슬래그의 분말도가 $8,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 을 치환한 경우 분말도 $4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 을 치환한 경우에 비해 평균 40% 높은 강도증진이 있음을 보였다. 본 실험에서 PSP 제는 비록 5~7.5% 치환되었지만 높은 분말도를 갖는 슬래그로서의 효과로 인해 재생 골재 콘크리트의 역학적 성능 향상에 기여하고 있다고 판단된다.

5. 결 론

재생골재 콘크리트의 현장 적용성을 높이기 위해 보통 콘크리트에 비해 큰 슬럼프 손실을 개선할 수 있는 분말형 감수제 (PSP제)를 개발하였다. 이 PSP제가 혼입된 콘크리트의 유동성 및 역학적 성질들이 재생 굵은골재와 재생 잔골재 혼입조건에 따라 평가되었다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PSP제가 혼입된 물-시멘트비 50%를 갖는 콘크리트의 초기 슬럼프는 목표 슬럼프 200 mm를 위해 액상형 폴리카르본산계가 투입된 콘크리트에 비해 최대 20% 정도 낮았지만 150 mm 이상의 슬럼프를 유지하였다.
- 2) 액상형 고성능 감수제를 투입한 콘크리트의 슬럼프는 시간경과와 함께 급격히 감소하며 120분 후에는 초기 슬럼프의 50%이하로 떨어졌다. 하지만 PSP제를 혼입한 콘크리트의 슬럼프는 배합 후 30분까지는 거의 변화가 없으며 1시간 경과 후에도 초기 슬럼프의 85% 이상을 유지하였다. 이는 PSP제 개발 단계에서 중점을 두었던 고성능 감수제의 효과가 시간의 경과와 함께 발휘되고 있음을 보여준다.
- 3) PSP제가 5% 첨가된 콘크리트는 재생 골재 종류 및 등급에 관계없이 슬럼프 손실 기울기가 2배 이상 개선되었다.
- 4) PSP제가 혼입된 콘크리트의 압축강도는 액상형 폴리카르본산계가 투입된 동일조건인 콘크리트와 같거나 평균 10% 높았다. 특히 PSP제가 혼입된 재생 골재 콘크리트의 압축강도 루트승에 대한 휨강도 및 탄성계수 비는 ACI 318-05 기준값 이상으로 향상시켰다.
- 5) PSP제는 콘크리트의 건조수축 변형률에 영향을 미치지 않지만 재령 90일에서는 액상형 감수제가 투입된 동일조건인 콘크리트에 비해 5~15%의 건조수축 변형률을 감소시켰다.
- 6) 재생골재 콘크리트의 슬럼프 손실을 개선하기 위해 본 연구에서 개발된 PSP제는 콘크리트의 유동성뿐만 아니라 역학적 성능들도 향상시켰다. 재생 골재 콘크리트의 유동성과 역학적 성능을 고려한 PSP제

의 적정 최대 혼입률은 시멘트 양 대비 5%이었다. 향후 슬럼프 손실이 특히 심한 재생 골재 콘크리트의 현장적용성을 높이는데 적극적으로 활용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2004년도 건설핵심기술 연구개발 사업의 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. 양근혁, 김용석, “고로슬래그를 사용한 재생 골재 콘크리트의 경시변화 및 역학적 거동의 평가”, 대한건축학회 논문집, 제21권, 4호, 2005, pp.117~124.
2. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Longman, 1996.
3. 한천구, 양성환, 황인성, “장시간 운반에 따른 콘크리트의 품질변화 및 품질회복제의 개발”, 대한건축학회 논문집, 제21권 4호, pp.125~132.
4. 김무한, 윤석천, “고성능감수제를 사용한 콘크리트의 시공성 향상 및 강도특성에 관한 기술적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제4권 5호, 1988, pp.323~333.
5. 한국콘크리트학회, 콘크리트의 재활용, 콘크리트 학회지 특집도서 시리즈, 2004.
6. Oikonomou, N. D., *Recycled concrete aggregates, Cement & Concrete Composites*, 2004, pp.1~4.
7. 윤재한 역저, 포틀랜드 시멘트 및 콘크리트, 세진사, 1996.
8. 양근혁, 이재삼, 정헌수, “골재 함수상태가 재생골재 콘크리트의 특성에 미치는 영향”, 대한건축학회 논문집, 제21권 10호, 2005, pp.103~110.
9. 한국표준협회, 한국산업규격(KS F-Series), 2005, 16pp.
10. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(318R-05)*, American Concrete Institute, 2005.
11. Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., and Kou, S. C., “Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol.34, 2004, pp.31~36.
12. 이맹호, 한상호, 윤재환 외 2인, “분말도가 다른 고로슬래그 미분말을 이용한 시멘트 모르타르의 압축강도 발형성에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권 2호, 1999. pp.548~553.

요 약 본 연구에서는 재생 골재 콘크리트의 현장적용성을 높이기 위해 보통 콘크리트에 비해 큰 슬럼프 손실을 개선할 수 있는 분말형 감수제 (PSP제)를 개발하였다. 이 PSP제가 혼입된 콘크리트의 유동성 및 역학적 성질들을 평가하기 위하여 재생 굵은골재와 재생 잔골재 혼입조건에 24배합이 실험되었다. 액상형 고성능 감수제를 투입한 콘크리트의 슬럼프는 시간경과와 함께 급격히 감소하며 120분 후에는 초기 슬럼프의 50% 이하로 떨어졌다 하지만 PSP제를 혼입한 콘크리트의 슬럼프는 배합 후 30분까지는 거의 변화가 없으며 1시간 경과 후에도 초기 슬럼프의 85% 이상을 유지하였다. 뿐만 아니라 PSP제는 콘크리트의 압축강도, 할렬인장강도, 휨강도 및 탄성계수들도 향상시켰으며 건조수축 변형률을 감소시켰다. 콘크리트의 성능향상을 고려하였을 때 PSP제의 최적 혼입률은 시멘트 양 대비 5%이었다.

핵심용어 분말형 감수제 (PSP), 재생골재, 슬럼프 손실, 역학적 성능, 건조수축 변형률