

고로슬래그 미분말 및 석고혼입에 따른 플라이애시 치환 콘크리트의 강도발현 특성

Strength Development of Fly ash Substituted Concrete due to Blast Furnace Slag Powder and Gypsum Addition

(2010년 5월 26일 원고접수, 2010년 6월 18일 심사완료/ Received May 26, Accepted June 18, 2010)

한친구¹⁾, 한민철¹⁾, 전규남^{1)*}

¹⁾청주대학교, 건축공학과

Cheon-Goo Han¹⁾, Min-Cheol Han¹⁾, Kyu-Nam Jeon¹⁾

¹⁾Department. of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongju, 360-764, Korea

Abstract

In this study, the effect of blast furnace slag and gypsum addition on strength development of fly ash substituted concrete is investigated experimentally. As a result, the fluidity represented a similar or larger level than that of OPC but showed a tendency to decrease the fluidity according to the increase in the replacement level of BS and GS for the FA replacement concrete. In the case of the air content, although it showed a larger decrease compared to that of OPC, it also represented that BS and GS did not affect the air content significantly. Regarding the compressive strength in the case of the replacement of BS and GS for the FA 10% replacement concrete, it showed a higher early strength than OPC. Whereas, in the case of the BS 5% replacement and GS 1% incorporation for the FA 10% replacement concrete showed the most excellent performance due to its high strength. In the correlation of the compressive strength according to the kinds of admixtures, it was evident that the GS incorporation played an important role in high strength gain.

키워드 : 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 석고, 품질향상

Keywords : Fly ash, Blast furnace slag, Gypsum, Quality improvement

1. 서론

우리나라의 경우 화력발전소에서는 매년 약 400-600 만톤의 석탄회가 발생하고 있는데, 이 중 일부는 재활용되고 있지만 잉여분은 폐기처분됨으로써 매립지의 부족현상이 심화되고 있는 실정이다. 그런데, 석탄회 중에서 발생량의 약 75%를 차지하는 플라이애시(이하 FA)인 경우는 상온에서 수산화칼슘과 반응하여 CSH겔을 생성하는 포졸란 물질로서, 이를 콘크리트용 혼화재로 사용할 경우에는 작업성 개선, 수밀성 증진, 수화열 저감을 통한 콘크리트의 균열감소 및 장기강도 증진 등의 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

그러나, FA가 다량 치환된 콘크리트의 경우는 초기강도

저하, 중성화 촉진 및 한중 시공 시 저온에 따른 응결지연 및 강도저하 등의 단점도 존재한다.

그러므로, 본 연구에서는 보통포틀랜드 시멘트(이하 OPC)에 FA를 치환한 콘크리트의 초기강도 저하 문제를 보완하기 위한 기초적 실험으로써, 상대적으로 미립자인 고로슬래그 미분말(이하 BS)과 초기수화성능 향상에 효과적인 이수석고(이하 GS)¹⁾⁻⁵⁾를 조합하여 콘크리트의 특성을 분석함으로써, FA치환 콘크리트의 초기강도 증진 등 품질향상에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 콘크리트 배합

* Corresponding author
E-mail : jkn83@nate.com

사항은 Table 2와 같다.

먼저 배합사항으로 W/C는 50% 1수준에 대하여, 보통 포틀랜드 시멘트 100%를 사용한 배합을 Plain 배합으로 하고, 혼화재료로써 FA 10%, 20% 2수준에 BS 2종을 0%, 2.5%, 5%, GS를 0%, 1%, 2% 각각 3수준씩을 혼합하여 총 15배치를 실험계획 하였다.

플레인 배합의 목표 슬럼프는 180 ± 25 mm로 설정하고, 목표 공기량은 4.5 ± 1.5 를 만족하도록 배합설계 하였으며, 기타의 실험변수에는 동일한 배합비를 적용하였다.

실험사항으로 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 슬럼프 플로우, 공기량, 단위용적질량을 측정하였고, 경화콘크리트에서는 압축강도를 측정하였다.

Table. 1 Design of experiment

Factors		Variables	
Mixture	W/B (%)	1	50
	Slump (mm)	1	180 ± 25
	Air content(%)	1	4.5 ± 1.5
	Plain	1	OPC
	Binder composition (%)	14	FA* 10 <ul style="list-style-type: none"> · BS** 0, 2.5, 5 · GS*** 0, 1, 2 FA 20 <ul style="list-style-type: none"> · BS 0, 2.5, 5 · GS 0, 1, 2
Experiment	Fresh Concrete	4	<ul style="list-style-type: none"> · Slump · Slump flow · Air content · Unit weight
	Hardened concrete	1	<ul style="list-style-type: none"> · Compressive strength (1, 3, 7, 28, 91 days)

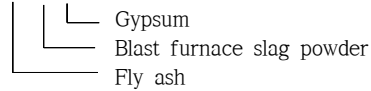
*FA : Fly ash, **BS : Blast furnace slag powder

***GS : Gypsum

Table. 2 Mixture proportions of concrete

Index	WC (%)	W (kg/m ³)	S/a (%)	AE/C (%)	SP (%)	Unit content(kg/m ³)					
						C	FA	BS	GS	S	G
OPC						364	0	0	0	763	994
F10-0-0*						327	36	0	0	758	937
F10-2.5-0						318	36	9	0	757	937
F10-2.5-1						314	36	9	4	757	937
F10-2.5-2						311	36	9	7	757	937
F10-5-0						309	36	18	0	757	937
F10-5-1						305	36	18	4	757	937
F10-5-2	50	180	45	0.004	0.55	302	36	18	7	757	937
F20-0-0						291	73	0	0	752	930
F20-2.5-0						282	73	9	0	751	930
F20-2.5-1						278	73	9	4	751	930
F20-2.5-2						274	73	9	4	751	930
F20-5-0						273	73	18	0	751	929
F20-5-1						269	73	18	7	751	929
F20-5-2						265	73	18	7	751	929

*F10-0-0



2.2 사용재료

Table. 3 Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Soundness (%)	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
			Initial time	Final time	3 days	7 days	28 days
3.15	3 165	0.18	235	320	12.5	22.5	42.5

Table. 4 Physical properties of FA

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Ig. loss (%)	Moisture (%)	SiO ₂ (%)	Activity factor (%)
2.22	4 012	3.40	0.10	47.44	97

Table. 5 Physical properties of BS

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Alkali-nitry (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	Ig. loss(%)
2.80	7 138	1.88	5.63	1.11	0.004	0.33

Table. 6 Physical and Chemical properties of GS

Density (g/cm ³)	Ingredient(%)						
	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SrO (%)
2.31	0.37	1.07	3.04	53.82	41.02	0.63	0.04

Table. 7 Physical properties of aggregate

Aggregates	Density (g/cm ³)	F.M	Water absorption (%)	Passing amount of 0.08 mm sieve(%)
Fine agg.	2.56	2.86	1.46	0.90
Coarse agg.	2.60	6.48	0.93	0.40

Table. 8 Physical properties of admixture

Kinds	Main ingredients	Appearance	Density (g/cm ³)
SP	Naphtalene	White yellow/liquid	1.06
AE	Negative ion	Light yellow/liquid	1.04

본 실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 3~8과 같다. 즉, 시멘트는 국내 A사산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재로써 잔골재와 굵은골재는 각각 중부 음성산 및 옥산산을 사용하였다. 그리고 혼화재료로서 플라이애시는 국내 화력발전소에서 발생된 것을 정제한 K사산을 사용하였고, 고로슬래그 미분말은 KS규격 2종을, 석고는 이수석고를 사용하였으며, AE제는 국내 E사산의 음이온계를, 고성능AE감수제는 국내 E사산 나프탈렌계를 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 트윈샤프트 믹서를 사용하여 혼합하는 것으로 하였으며, 굳지 않은 콘크리트의 특성 실험으로, 슬럼프는 KS F 2402, 슬럼프 플로우는 KS F 2594, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 KS F 2409의 규정에 의거 실시하였고, 경화 콘크리트의 특성 실험으로써 압축강도는 Ø 100×200 mm 공시체를 이용하여 KS F 2405에 의거 계획된 재령에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

3.1.1 유동성

Fig. 1은 BS 및 GS 혼입에 따른 FA 치환 콘크리트의 슬럼프를 나타낸 그래프이고, Fig. 2는 슬럼프 플로우는 나타낸 그래프이다. 먼저 슬럼프는 FA 10% 치환 콘크리트의 경우 OPC와 유사한 값을 나타냈으나, FA 20% 치환 콘크리트의 경우는 OPC에 비해 크게 되는 양상을 보였다. 이는 FA의 구형입자가 볼베어링 작용을 하여 유동성이 향상되어진 것으로 분석된다. 그러나 FA 치환 콘크리트에 BS와 GS의 치환량이 증가 할수록 점차 슬럼프가 감소하는 경향을 나타냈는데, 이는 BS의 높은 분말도로 인해 수분을 흡착하는 성질이 상대적으로 커서 점성이 증대되어 유동성을 저하시키는 것으로 판단되며,⁶⁾ 특히 FA 10% 치환 콘크리트의 경우가 FA 20% 치환 하였을때 보다 슬럼프 감소율이 더 크게 나타났다. 슬럼프 플로우는 슬럼프와 유사한 경향으로 FA 치환율이 증가할수록 유동성이 증가하는 것으로 나타났으나, BS와 GS의 치환율이 증가함에 따라 저하하는 경향이 나타났다.

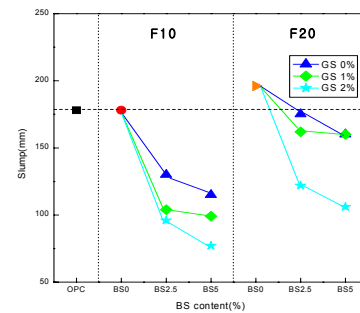


Fig. 1 Slump with binder compositions

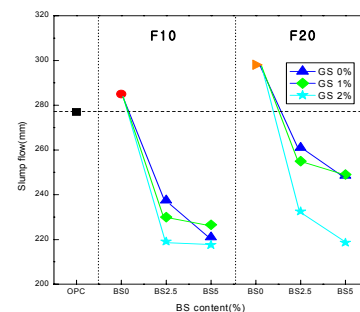


Fig. 2 Slump flow with binder compositions

3.1.2 공기량 및 단위용적질량

Fig. 3은 BS 및 GS 혼입에 따른 FA 치환 콘크리트의 공기량을 나타낸 그래프이고, Fig. 4는 단위용적질량을 나타낸 그래프이다. 먼저 공기량은 OPC에 FA 10%와 FA 20%를 치환한 경우 OPC에 비해 공기량이 크게 감소하는 경향을 나타냈는데 이는 FA에 혼입되어 있는 미연소탄분의 AE제 흡착작용에 기인한 것으로 판단된다. 또한, BS 및 GS 치환을 변화에 따른 공기량은 변화가 적은 것으로 나타나 BS와 GS가 공기량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석된다. FA, BS 및 GS 치환을 변화에 따른 단위용적질량은 전반적으로 공기량의 증가와 감소의 경향에 따라 반대의 경향을 나타내었다.

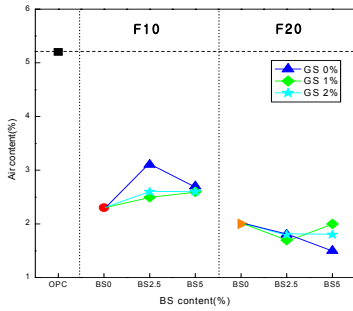


Fig. 3 Air content with binder compositions

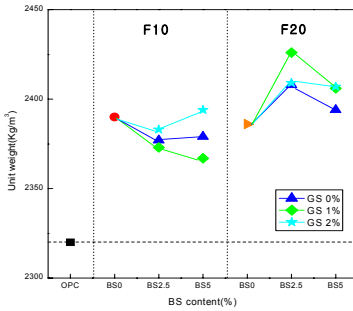


Fig. 4 Unit weight with binder compositions

3.2 경화 콘크리트의 특성

3.2.1 압축강도

Fig. 5-9는 BS 및 GS 혼입에 따른 FA 치환 콘크리트의 압축강도를 재령별로 나타낸 그래프이다. 재령 1일의 경우 FA 치환 콘크리트에 BS만을 치환하였을 경우에는 초기 압축강도 발현율이 FA 치환 콘크리트와 유사하거나 감소하는 경향을 나타냈으나, FA 10% 치환 콘크리트에 BS 및 GS를 복

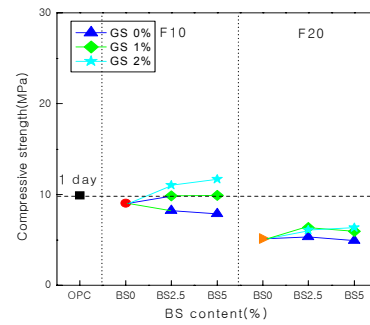


Fig. 5 Compressive strength with binder compositions (1 day)

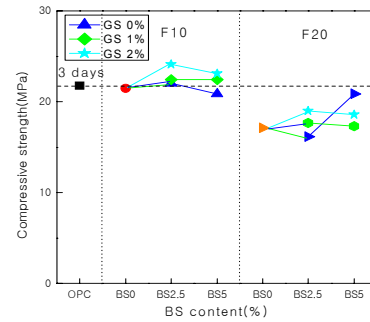


Fig. 6 Compressive strength with binder compositions at 3 days

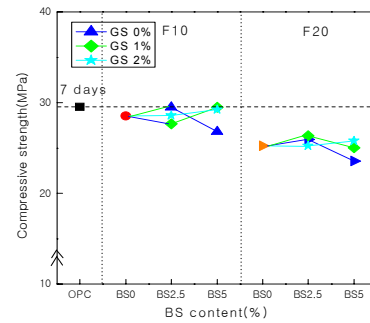


Fig. 7 Compressive strength with binder compositions at 7 days

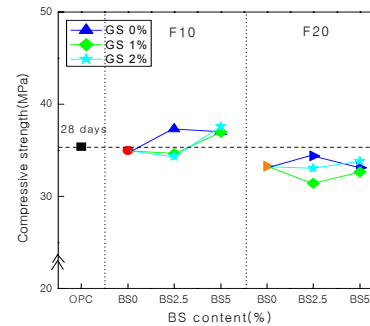


Fig. 8 Compressive strength with binder compositions at 28 days

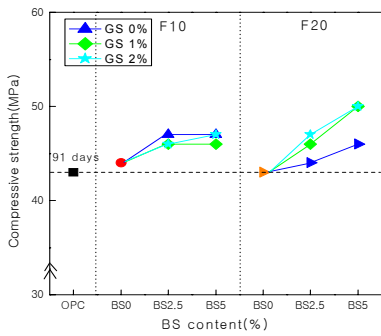


Fig. 9 Compressive strength with binder compositions at 91 days

합 치환한 경우는 OPC와 유사 혹은 증진된 압축 강도를 보이며, FA 치환 콘크리트의 가장 큰 문제점인 초기 강도 저하 문제가 해소된 것을 확인 할 수 있었다.

FA 20% 치환 콘크리트에 BS 및 GS를 치환한 경우 또한 OPC보다는 다소 낮은 강도를 나타내었지만 FA 20%만을 치환한 경우보다 GS의 치환율이 높아짐에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 고로슬래그 미분말의 경우 강한 잠재수경성 반응으로서, 즉 고로슬래그 미분말이 물과 섞이게 될 경우 화학적 반응으로 인해 고로슬래그 표면에 겔막을 형성하게 되는데, 이를 석고의 황산염이 자극제가 되어 고로슬래그의 OH를 흡착하고 고로슬래그의 표면막을 파괴함에 따라 고로슬래그의 수화반응이 촉진되어 나타난 결과로 판단된다.⁷⁾

이후 3일과 7일의 경우 또한 재령 1일과 유사한 경향으로 GS의 치환율이 증가할수록 초기재령에서 수화반응이 활발해 지면서 FA 단독 치환보다 높은 강도 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 재령 28일의 경우는 FA 10% 및 20% 치환 콘크리트에 GS의 혼입율이 증가함에 따라 다소 강도의 발현이 낮은 경향을 나타내었는데, 이는 초기재령에서 석고가 잠재수경성반응을 급격히 유도하면서 후기에 수화반응이 완만해지는 결과로 판단되며,⁸⁾ 91일로 진행되면서 FA치환 콘크리트에 BS 및 GS를 치환한 경우 BS의 잠재수경성, FA의 포졸란 반응으로 인해 전반적으로 강도가 크게 향상되는 것으로 나타났다.

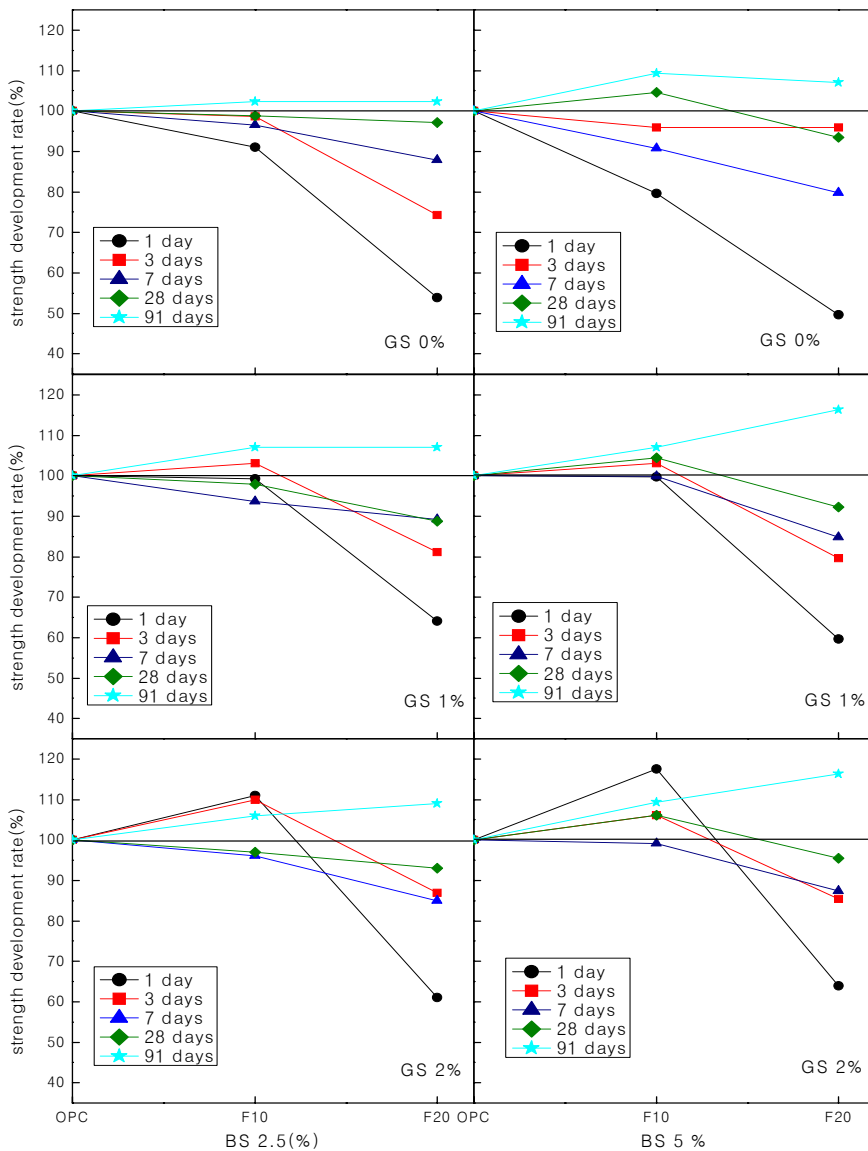


Fig. 10 Strength development rate with binder compositions and ages

3.2.2 강도발현율

Fig. 10은 BS 및 GS 혼입에 따른 FA 치환 콘크리트의 재령별 압축강도 발현율을 나타낸 그래프이다. 먼저, GS 0%의 경우 BS 2.5% 및 5% 치환 하였을때 초기재령 강도발현율은 모두 OPC에 비해 크게 저하하는 경향을 나타내었으나, 재령 후기인 28일 및 91일의 경우는 GS의 영

항 없이도 OPC보다 큰 강도 발현율을 나타내었는데, 이는 포졸란 반응에 의해 생성된 2차 C-S-H 겔의 생성으로 콘크리트 내부가 치밀해져 나타난 결과로 판단된다.⁹⁾ 그 중 강도발현율의 향상은 BS 치환량이 증가할수록 더 높은 강도발현율을 나타내었으며, 이는 BS의 치환량이 커지면서 내부공극이 충전되면서 나타난 결과로 판단된다.

반면 GS를 1% 혼입한 경우는 BS 2.5% 및 5% 치환 모두 재령 1일부터 OPC보다 크게 강도가 발현되는 것으로 나타내었는데, 이는 GS의 혼입이 FA치환 콘크리트의 초기 수화반응에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. GS를 2% 혼입하였을 경우는 전반적으로 초기 재령부터 높은 강도발현율을 나타내었는데 그 중 FA 10% 치환 콘크리트에 BS 5%를 치환한 경우 초기 1일 재령에서 OPC보다 120%에 가까운 강도발현율을 나타내었다.

반면 FA 20% 치환 콘크리트에 GS를 2%를 혼입한 경우 GS 0%와 1%에 비해 다소 높은 값을 나타내었으며, GS의 혼입량이 커질수록 압축강도발현율은 커짐을 알 수 있었다.

이러한 사항들을 모두 종합 하였을 때 본 연구의 FA치환 콘크리트의 최적의 BS 및 GS의 혼입율은 FA 10% 치환 콘크리트에 BS 5% 및 GS 1% 치환 시 초기 및 장기 재령 모두 여타 배합에 비해 높은 강도발현율을 나타내어 F10-5-1 조합을 활용시 FA 치환 콘크리트의 초기 낮은 강도발현을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 결합재 종류별 압축강도 상관관계

Fig. 11~13는 결합재 종류별 압축강도의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 먼저 OPC와 FA 치환의 경우 FA 10% 치환 시 OPC와 유사한 강도를 나타내었으나, FA 20% 치환의 경우 OPC에 비해특히 초기에서 적은 강도를 나타내었지만 재령 후기로 갈수록 OPC와 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다.

FA 치환 콘크리트와 FA 치환 콘크리트에 BS를 치환한 경우는 재령 초기에 유사한 값을 나타내어 BS가 초기강도에 크게 기여는 하지 못하였으나 재령 후기로 갈수록 근소한 값의 차이로 FA 치환 콘크리트에 비해 높은 강도를 발휘하여 재령 후기에 양호하게 기여함을 알 수 있었다.

FA치환 콘크리트에 BS만을 치환한 경우와 GS를 혼입한 경우는 GS를 혼입하지 않았을 경우에 비해 GS를 혼입함에 따라 재령 초기 높은 강도값을 나타내었으며, GS 2% 혼입할 시 GS 1%에 비해 전반적으로 강도가 높게 나타나, 결국 GS의 영향이 초기강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

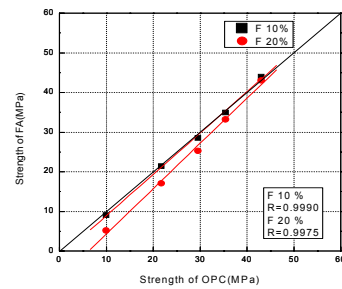


Fig 11. Relationship of strength between OPC and FA

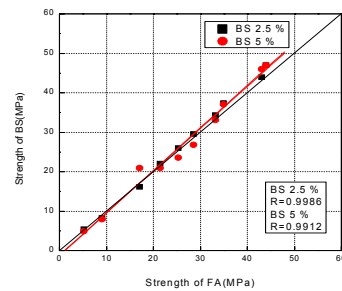


Fig 12. Relationship of strength between FA and BS addition

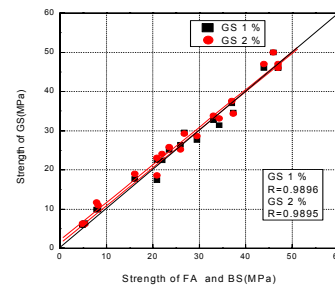


Fig 13. Relationship of strength between FA, BS and GS addition

4. 결론

본 연구에서는 FA 치환 콘크리트의 초기 저강도발현특성을 BS 및 GS 혼입으로 해결할 수 있는지의 가능성을 검토하기 위해 콘크리트의 기초적 특성 실험을 진행하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 유동성은 FA치환 콘크리트에 BS와 GS의 치환율이 증가함에 따라 저하하는 경향을 나타내었는데, FA 10% 치환된 경우보다 FA 20% 치환시 FA량이 증가함에 따라 OPC와 유사하거나 비교적 크게 나타나는 양상을 보였다. 공기량은 OPC에 비해 FA의 치환율이 증가할수록 FA의 AE제 흡착 작용에 의해 크게 감소하는 경향을 나타냈으나, BS와 GS가 공기량에 미치는 영향은 크지 않았다. 단

위용적질량의 경우 공기량과 반대되는 경향을 나타내었다.

2) 압축강도의 경우 FA 10% 치환 콘크리트에 BS 및 GS를 치환 하였을 시 GS가 FA치환 콘크리트의 초기 급격한 수화를 유도하면서 OPC보다 높은 초기강도를 나타내었으며, FA 20% 치환 콘크리트의 경우도 마찬가지로 GS의 혼입율이 커짐에 따라 초기강도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 후기 재령으로 진행되면서 FA 치환 콘크리트의 강도 발현성능은 장기재령에서 FA의 포졸란 반응 및 BS의 잠재수경성반응으로 인해 수화가 활발해지면서 높은 강도를 나타내었다.

3) 결합계 종류별 압축강도 상관관계는 OPC에 FA 단독 치환한 경우 초기 낮은 강도를 나타내었으나, 장기재령에서 유사해짐을 알 수 있었으며, FA 치환 콘크리트와 FA 치환 콘크리트에 BS만을 혼입한 경우는 초기 강도의 기여도는 크지 않았으나, 장기재령에서 강도를 발휘하는 것을 알 수 있었으며, FA 치환 콘크리트에 BS만 치환된 경우와 FA 치환 콘크리트에 BS 및 GS를 혼입한 경우 GS가 초기 빠른 수화를 유도하면서 FA 치환 콘크리트에 BS만을 치환한 경우에 비해 초기재령부터 높은 강도를 나타내어 GS의 영향이 중요함을 알 수 있었다.

이상을 종합하면, FA 10% 치환콘크리트에 석고를 혼합 치환함에 따라 초기강도발현 성능이 크게 향상되는 효과가 있었으나, FA 20% 치환 콘크리트의 경우는 초기재령에서 다소 낮은 강도 경향을 나타내었는데, 초기 높은 강도 발현을 위해서는 알칼리 자극제 사용등의 특별한 조치가 필요할 것으로 판단되었다.

참고문헌

- 1) A. Xu, S. L., Sarkar, Microstructural study of gypsum activated fly ash hydration in cement paste, Cem.Concr: Res.,Vol.21, pp.1137-1147, 1991
- 2) Ai Qin, W., Chengzhi, Z., Mingshu, T., and Ninsheng, Z., ASR in mortar bars containing silica glass in combination with high alkali and high fly ash contents, Cement and Concrete Research., Vol.21, pp.375-382, 1999
- 3) Ma, W., Liu, C. L., Brown, P. W., and Lomarneni, S., Pore structures of fly ash activated by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Cement and Concrete Research., Vol.25, No.2, pp.417-425, 1995
- 4) Shi, C., Early microstructure development of activated lime-fly ash pastes, Cement and Concrete Research., Vol.26, No.9, pp.1351-1359, 1996
- 5) Poon, C. S., Kou, S. C., Lam, L., and Lin, Z. S., "Activation of fly ash/cement systems using calcium sulfate anhydrite (CaSO_4)," Cement and Concrete Research.,Vol.31, No.6, pp.873-881, 2001
- 6) 이상수, 송하영, 이승민, 콘크리트 특성에 미치는 고분말도 플라이애쉬의 치환을 및 물-결합재비 영향에 관한 실험적 연구, 콘크리트학회 논문집, Vol. 21, No. 1, pp. 29~35, 2009.2
- 7) Japan cement association, "CEMENT&CONCRETE", pp.90-91
- 8) 조병완, 박민석, 박승국, 알칼리 활성화에 의한 플라이애쉬 모르타르의 강도발현 및 경화 메커니즘, 콘크리트학회 논문집, Vol. 18, No.4, pp.449-458, 2006.8
- 9) 배수호, 박재임, 이광명, 콘크리트의 황산 및 황산염 침투 저항성에 미치는 광물질 혼화제의 영향, 콘크리트학회 논문집, Vol. 22, No. 2, pp.219~228, 2010. 4

고로슬래그 미분말 및 석고혼입에 따른 플라이애시 치환 콘크리트의 강도발현 특성

본 연구에서는 플라이애시 치환 콘크리트에 초기 저강도발현특성을 고로슬래그 미분말 및 석고혼입으로 해결할 수 있는지의 가능성을 검토하기 위하여 콘크리트의 기초적 특성에 대하여 분석하였다. 그 결과 굳지 않은 콘크리트의 특성으로 유동성은 FA 치환의 경우 OPC와 유사하거나 비교적 크게 나타나는 양상을 보였으나 FA 치환 콘크리트에 BS와 GS의 치환량이 증가 할수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 FA 20% 치환 콘크리트의 경우가 FA 10% 치환 하였을때 보다 슬럼프 감소율이 크게 나타났다. 공기량은 OPC에 비해 FA 치환의 경우 크게 감소하는 경향을 나타내었으나, BS와 GS가 공기량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 경화 콘크리트의 특성으로 압축강도는 FA 10% 치환 콘크리트에 BS 및 GS를 치환한 경우 OPC보다 초기에 높은 강도를 나타내었으며, FA 20% 치환 콘크리트의 경우 강도 발현이 다소 낮은 것으로 나타났는데, 그중 FA 10% 치환 콘크리트에 BS 5% 치환, GS 1% 혼입시 전반적으로 높은 강도를 나타내어 가장 우수한 결과를 나타내었다. 결합재 종류별 압축강도의 상관관계의 경우 GS 무 혼입에 비해 GS를 혼입 할 시 전반적으로 높은 강도를 나타냄으로써 GS의 영향이 강도발현에 중요한 역할로 작용함을 알 수 있었다.