

엑상 실리카흙을 혼입한 콘크리트의 파괴특성

박 제 선 · 민 창 동* · 김 태 경** · 이 주 형***

A Study on Fracture Properties of Concrete With Silica Fume

Je-Seon Park · Chang-Dong Min* · Tae-Kyung Kim** · Joo-Hyeung Lee***

ABSTRACT

The experimental study is conducted to analyze the characteristics of concrete included silica fume. The workability of concrete is controled by the ratio of mixture, such as superplasticizer, based on the constant rates of sand and cement. It is concluded that the strength and the frectu Toughness of concrete with silica fume are very improved.

1. 서 론

근래에 접어들어 콘크리트 구조물이 장대화 대형화되는 등 국내·외의 건설 환경이 급변함에 따라 콘크리트 공사의 합리화가 요구됨은 물론, 작업자의 숙련도나 공법 등에 좌우되지 않는 고품질, 고내구성의 고강도 콘크리트의 개발이 요구되어지고 있는 실정이다. 이와같은 고강도 콘크리트의 개발은 고강도화에 따른 부재 단면의 축소, 자중의 감소, 장대화, 고층화 그리고 유효공간의 이용 등 경제적인 면에서도 상당히 유리하다.

연구동향을 살펴보면, 실리카흙을 혼입한 콘크리트의 물리·화학적 영향

및 배합관계에 대한 연구가 이루어졌으며,⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 실리카흙의 혼입량 및 혼화제의 첨가량, 양생온도, 수화열 등 다양한 요소들에 대해 연구를 수행하여 강도 및 탄성계수, 건조수축등 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 고찰하였다.⁽¹³⁾

그 밖에 고강도 콘크리트에 대하여 선형탄성 파괴역학이론을 근거로 제시된 경계조건하에 일축 인장강도시험을 실시하여 얻은 하중-변위 곡선으로부터 파괴에너지 및 파괴인성, 파괴진행영역의 유효길이등 파괴특성에 대해 실험 결과를 토대로 고찰하여 제시된 바 있다.⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

고강도 콘크리트개발의 기초적 연구로서 본 연구는 실리카흙을 혼화제로 사용하였다. 또한 소정의 워어커빌리티를 만족시키기 위하여 AE감수제 및 고성능유동화제로

강원대학교 토목공학과 교수

* 충주산업대학교 토목공학과 교수

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

*** 강원대학교 토목공학과 석사과정

시료 제작과정에 첨가하였다.

제작된 시료를 사용하여 실리카흙의 혼입량에 따른 제반 특성, 즉 고성능 유동화제 첨가량에 대한 영향, 압축강도, 탄성계수, 그리고 파괴인성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험재료

본 연구에서 사용된 골재로 굵은 골재는 춘천지역에서 생산되는 비중 2.61인 레미콘 제조용 쇄석으로 하였고, 잔골재는 강원도 홍천강에서 채취한 비중 2.60, 조립율 2.99인 강모래를 사용하였다.

시멘트는 비중 3.12인 국내 S 사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 미국 Grace사 제품인 실리카흙을 물과 1:1의 혼합비율로 하여 비표면적 1.8~2.0m²/g, 비중 2.2인 액상실리카흙을 혼입하였다.

감수제는 국내 K사 제품인 비중 1.18인 AE 감수제와 동일사 제품인 비중 1.21인 나프탈렌 설포네이트 나트륨계 제품인 고성능 유동화제를 사용하였다.

3. 배합설계 및 시험방법

3.1 배합설계

콘크리트의 배합은 Table 1.과 같은 조건으로 슬럼프값 18±2cm의 워어커빌리티를 확보할 수 있도록 고성능 유동화제의 첨가량을 달리하여 실험을 실시하였다.

콘크리트 비빔은 시멘트, 잔골재, 굵은골재 순으로 투입하여 각각 30초간 건비빔을 실시한 후, 액상실리카흙과 혼합수(물-AE 감수제)를 투입하여 1분30초간 비빔 하였다. 그리고 최종적으로 고성능 유동화제를 넣어 1분30초간 재비빔을 실시하였다.

콘크리트 타설은 11월초에서 12월 중순에 걸쳐 4°C 전후에서 이루어졌으며, 경화된 콘크리트는 20±3°C에서 수중양생을 하였다.

Table 1. Contents of Mixed Concrete

Variable	C (Kg/m ³)	S/A (%)	Super- 20	W/ (C+SF) (%)	SF/ (C+SF) (%)
Quantity	700	40	0.3%	28.5, 31.5, 34.5	0, 10, 20, 30

(C=Cement, SF=Silica Fume)

3.2 시험방법

원통형 공시체(10×20cm)를 각 배합조건별로 제조하여 압축강도를 측정하였으며, 분석시에는 보다 신뢰성 높은 결과를 얻기 위해 최저치와 최고치를 제외하였다. 그리고 탄성계수는 원통형 공시체의 압축강도 시험시 KS F 2438에 의하여 측정하였다. 이 모든 시험에서도 최저치와 최고치를 제외한 값들만 분석에 사용하였다.

파괴시험을 위한 공시체는 폭10, 높이10 길이 46cm(지간 40cm)의 빔 공시체를 제조하였으며, 모든 공시체에 공히 5mm 폭의 초기 균열비 0.3의 균열을 보의 중앙 하연에 만들었고, 보높이대 지간(S/W)비는 4를 기준으로 하였다. 3점 휨시험방법에 의하여 재하속도 2.6kg/sec의 정하중을 재하였다. 이때, 보 중앙의 처짐을 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 보하단 초기균열의 양쪽에 설치하였으며, 공시체 파괴후 초기 균열의 길이를 측정 하였다.

Fig. 1과 같은 하중-처짐 곡선으로부터 P_i, P_{max}, d_{pi}, d_{pmax}를 구하였다.

파괴인성(K_{1c})는 이 값들과 유효균열모델(Effective Crack Model)에서 제시된 다음 식(1)을 이용하여 구하였다.⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁹⁾

$$K_{1c} = 1.13782 \sigma_n \sqrt{a_e} F_1(\alpha_e) \quad (1)$$

여기서, $\sigma_n = 6M / (BW^2)$,

$M = (P_{max} + wS/2)S/4$ 이다.

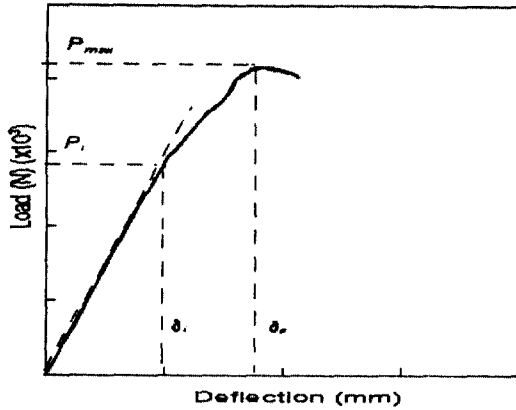


Fig. 1. A Typical load-deflection plot for a notched concrete beam

4. 결과 분석

2장에서 제시된 여러 실험조건에 맞게 정확히 제작된 시료를 이용하여 액상 실리카흙의 혼입량에 대한 고성능 유동화제에 대

한 영향, 압축강도와 탄성계수와의 관계 및 파괴인성에 대하여 분석하였다.

먼저, 소정의 워어커빌리티하에서 액상 실리카흙의 혼입량에 따른 고성능 유동화제의 첨가량에 대한 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

물-결합재비가 28.5%일때 액상실리카흙의 혼입량이 10%까지 고성능 유동화제 첨가량은 급격히 감소하였으나, 20%, 30%로 증가함에 따라 완만한 감소를 보여주고 있다. 그러나, 물-결합재비가 31.5%, 34.5%로 증가할 경우 고성능유동화제의 첨가량은 액상실리카흙의 혼입량이 증가할수록 약간의 차이는 있으나 유사한 첨가량이 필요로 함을 알 수 있다. 따라서, 고성능유동화제는 액상실리카흙의 혼입량이 증가할수록, 물-결합재비가 증가할수록 첨가량이 감소하는 경향을 보이고 있다.

액상실리카흙의 혼입량에 따른 콘크리트의 압축강도 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

먼저, 물-결합재비28.5%일 때 액상 실리카흙

Table 2. Results of 3PB Test on Concrete Beams

Silica fume Ratio(%)	W/(C+SF) Ratio(%)	Beam dimensions (mm)			a_0/W	a_c (mm)	P_i (N)	P_{max} (N)	d_{pi} (mm)	d_{pmax} (mm)	σ_n (MPa)	K^c_{Ic} (MPa \sqrt{m})
		S	B	W								
0	28.5	400	99.80	100.0	0.300	36.30	2440	3430	0.090	0.150	2.089	0.895
	34.5	400	100.0	99.50	0.300	33.08	2842	3675	0.105	0.147	2.254	0.890
10	28.5	400	99.80	101.0	0.300	33.03	3038	4655	0.10	0.165	2.770	1.086
	31.5	400	99.80	100.5	0.296	37.54	3038	4900	0.075	0.150	2.940	1.300
	34.5	400	99.80	99.50	0.296	31.29	2940	3920	0.108	0.150	2.408	0.908
20	28.5	400	100.0	100.0	0.300	33.00	3332	5145	0.105	0.175	3.114	1.225
	31.5	400	99.9	101.0	0.299	40.30	3871	5390	0.080	0.150	3.199	1.518
	34.5	400	99.70	99.0	0.300	35.94	3430	4655	0.097	0.155	2.880	1.231
30	28.5	400	100.0	100.0	0.300	33.00	3332	5292	0.105	0.180	3.202	1.260
	31.5	400	99.8	101.0	0.300	47.98	4214	5586	0.075	0.175	3.319	1.962
	34.5	400	99.70	99.00	0.300	37.92	3528	4900	0.092	0.160	3.036	1.366

의 혼입량이 0%인 경우 콘크리트의 압축강도는 292.8kg/cm²로 나타났으며, 액상실리카흙의 혼입량이 10%, 20%, 30%로 증가함에 따라 1.35배, 1.52배, 1.72배로 증가함을 보여주고 있다. 다음 물-결합재비가 31.5%일 때를

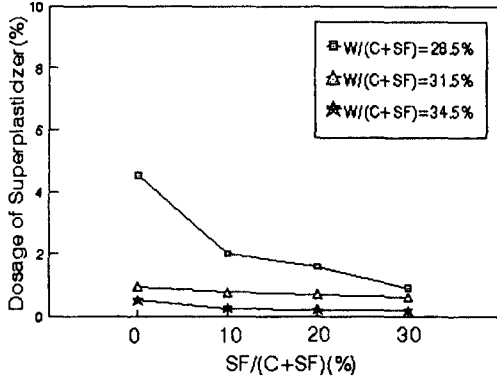


Fig. 2. Relation of Dosage of Superplasticizer with Silica Fume Content

살펴보면, 액상 실리카흙의 혼입량이 0%인 경우 압축강도는 361.18kg/cm²로 나타났으며, 액상실리카흙의 혼입량 증가에 따라 1.08배, 1.01배, 1.18배로 증가함을 보여주고 있다. 마지막으로 물-결합재비가 34.5%에서는 액상 실리카흙의 혼입량이 0%인 경우 압축강도는 330.30kg/cm²로 나타났으며, 액상실리카흙의 혼입량이 10%, 20%, 30%로 증가함에 따라 1.02배, 1.07배, 1.11배로 증가함을 보여주고 있다. 그러므로 액상 실리카흙의 혼입량이 증가할수록, 물-결합재비가 적을수록 콘크리트 압축강도는 증가하는 경향을 보이고 있다.

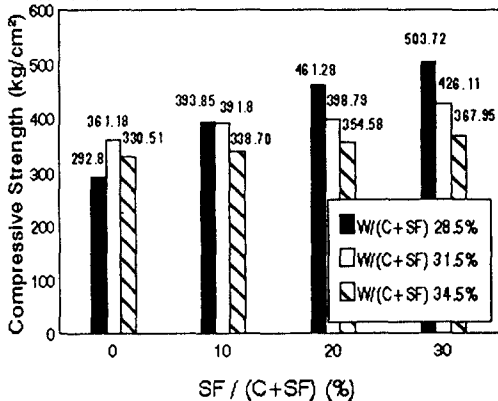


Fig. 3. Compressive Strength

액상실리카흙의 혼입량 변화에 따른 압축강도와 탄성계수와의 관계를 Fig.4에 나타내었다. 이 결과는 3개의 시험체에 대한 결과

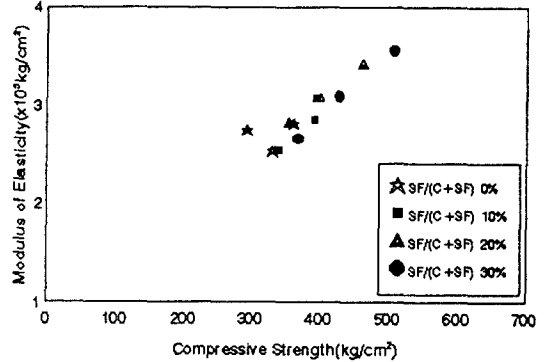


Fig. 4. Relation between Modulus of Elasticity and Compressive Strength

치를 평균한 값으로서 액상실리카흙의 혼입량이 증가함에 따른 압축강도와 탄성계수와의 관계는 거의 유사한 경향을 보이고 있다는 사실을 알 수 있었다.

액상실리카흙의 혼입량이 증가할수록 고강도 발현이 가능하고, 또한 탄성계수의 경우 기존의 일반콘크리트에서 적용하고 있는 탄성계수 식을 사용하여도 그 결과치는 거의 유사하게 나타났다.

액상실리카흙의 혼입량 변화에 따른 콘크리트의 파괴인성(K_{IC})을 비교·조사하기 위하여 초기균열(a₀)이 존재하는 보에 대하여 파괴시험을 수행하였다. 그 결과를 Table 2, 와 Fig. 5에 제시 하였다.

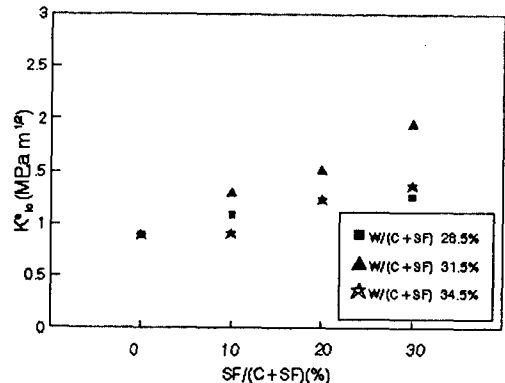


Fig. 5. Relation of Fracture Toughness and Silica Fume Content

파괴인성치는 재료의 급속파괴에 대하여 견디는 힘을 나타내는 지수로서, 액상실리카흙의 혼입량이 증가할수록 파괴인성치가 크게 나타나며 높은 파괴저항력을 갖게됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 액상 실리카흙을 혼입한 고강도콘크리트의 역학적 특성 및 파괴특성을 규명하기 위하여 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고성능유동화제는 액상실리카흙의 혼입량이 많을수록, 물-결합재비가 증가할수록 첨가량이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

2) 최대 압축강도는 액상실리카흙의 혼입량이 30%이고, 물-결합재비가 28.5%일때 503.72 kg/cm²로 나타났다.

4) 액상실리카흙의 혼입량 증가에 따른 압축강도와 탄성계수와의 관계는 일반 콘크리트와 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

5) 파괴인성은 액상실리카흙의 혼입량이 증가할수록 크게 나타나며, 높은 파괴저항력을 지님을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Bairagi, N. K., Vidyadhara, H. S. and Ravende, K., "Mix Design Procedure for Recycled Aggregate Concrete", Construction & Building Materials, Vol. 4, No.4, 1990, pp. 188-193.
- [2] Jeng, Y. S and Shah, S. P "Two-Parameter Fracture Model for Concreet", J. of Eng. Mech.,ASCE Vol.111, No.10, 1985, pp.1227-1241.
- [3] Karihaloo, B.L., and Nallathambi, P. "Effective Crack Model for the Determination of Fracture Toughness (K_{IC}) of Co-ncrete", J. Eng. Fracture Mech, Vol. 35, 1990, PP.637-645.
- [4] 김광우,박제선,이봉학,김진영, "재생 폐콘크리트의 성능향상에 관한 연구", 콘크리트학회지 Vol. 7, 1995. pp.136-145.
- [5] 문한영, 문대중, 신승호, "실리카흙을 혼입한 고강도콘크리트의 강도향상을 위한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집 제 14 권. 1994.
- [6] 박제선, 권승준,김태경,이재호, "고강도 콘크리트의 역학적 성질에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1994, pp.401-404
- [7] 박제선,김태경,이주형,백민경, "실리카흙을 혼입한 고강도콘크리트의 파괴특성에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1995, pp. 363-366.
- [8] Rachel, J. D and Mehta, P.K "Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete", ACI Material Journal, Vol.86, No.6, 1989, pp.609-614.
- [9] RILEM, "Fracture Mechznics Test Methods for Concrete", Report of technical committee 89-FMT, Ed. by

Shah and Carpinteri,1991,pp.22-35.

- [10] Shah, S. P and Carpinteri, A., "Fracture Mechanics Test Methods for Concrete", Chapman and Hall, London. 11. Shah, S. P and Ouyang, C., "Toughening Mechanisms in Quasi Brittle Materials", Transactions of the ASME, Vol. 115, 1993, pp.300-326.
- [12] Srawley, J. E., "Wide-Range Stress Intensity Factor Expressions for A STM E399 Standard Fracture Toughness Specimens", Int. J. of Fracture, Vol.12, 1976, pp.475-476.
- [13] Vladimir Novokshchenov, "Factors Controlling the Compressive Strength of Silica Fume Concrete in the Range 100 to 150MPa", Proceeding of SLN 1993, pp.863-8738.