

화학적 프리스트레스가 도입된 강섬유 보강 콘크리트의 균열거동에 대한 연구

A Study on Crack Behavior of Chemically Prestressed Steel Fiber Reinforced Concrete

심 별^{*} 김 영 균^{**} 송 하 원^{***}
Shim, Byul Kim, Young Kyun Song, Ha Won

ABSTRACT

In this paper, a series of fracture tests are performed for the chemically prestressed steel fiber reinforced concrete (SFRC) manufactured with addition of expansive additives for the study of fracture behavior and characteristics. Cracking loads of the chemically prestressed SFRC are greater than that of normal concrete and those are also increased by increasing of steel fiber volume. Thus, it is necessary to obtain optimum steel fiber volume to induce chemically prestressing effectively to concrete members. The result of three-points bending tests shows that early-cracking resistance of the chemically prestressed SFRC is increased without increase of fracture energy. From the test, the tension softening curves are also obtained by poly-linear approximation method and simulated behaviors by using the determined tension softening curves agree with experimental results. And it is confirmed that cracking and ultimate behaviors of chemically prestressed SFRC can be predicted by using obtained fracture characteristics.

1. 서 론

콘크리트 구조물에는 경화과정 및 건조수축, 수화열에 의한 온도응력 등의 다양한 원인으로 균열이 발생할 수 있는데, 이러한 구조물에 유해한 균열을 방지하기 위한 방법 중에 하나로 팽창재를 첨가하는 방법이 있다. 팽창재의 활용에 대한 연구는 수동적인 수축변형의 보상뿐만 아니라, 부재 내·외부의 구속으로 팽창량을 조절하여 화학적 프리스트레스에 의한 압축응력을 도입하고 콘크리트의 부족한 인장특성을 개선하는 능동적인 영역으로 확장되어 가고 있다. 본 연구에서는 강섬유에 의해 내부구속이 이루어진 경우에 대한 팽창 콘크리트의 파괴특성 시험을 통해서 화학적 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 파괴특성을 도출하였다.

2. 팽창 콘크리트의 파괴특성

화학적 프리스트레싱 콘크리트는 팽창재를 비교적 다량인 $40\sim 70\text{kg/m}^3$ 정도를 사용한 콘크리트로 내부적으로는 철근이나 강섬유, 외부적으로는 보, 기둥, 거푸집 등으로 팽창을 구속하여 화학적 팽창으로 콘크리트 부재에 프리스트레스를 도입시킨 것으로, 팽창으로 도입된 화학적 프리스트레스는 건조수

*정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정
**정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원
***정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

축에 의해 그 크기가 감소되더라도 여전히 남게되어 부재의 균열 저항성 등을 증대시킬 수 있다. 본 논문에서는 일본콘크리트협회의 "TC-992, Test method for fracture property of concrete"에서 입안된 표준시험방법에 따라 섬유보강 콘크리트의 노치를 준 보의 파괴에너지를 산출하였다(Kitsutaka and Uchida, 2002)

인장연화곡선은 인장력의 작용에 의한 균열 이후의 거동을 설명하기 위해서 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 유한요소 해석이 포함된 다직선 근사해석법을 사용하여 인장연화곡선을 도출하였는데, 이 방법은 Kitsutaka(1995)이 제안한 것으로 시험을 통해 얻은 하중-변위 또는 하중-CMOD 곡선을 기초로 하여 가상균열 모델을 통한 역해석 방법을 통해 인장연화곡선을 추정하는 방법이며, 높은 정밀도로 인장연화곡선을 도출하는 것이 가능하다고 알려져 있다. 다직선 근사해석법에서는 시험을 통해 얻어진 하중-변위 관계 혹은 하중-CMOD 관계와 일치되는 최적의 인장연화곡선의 형태를 결정하는 과정을 순차적으로 반복하여 인장연화곡선의 전체 형상을 결정하게 된다(Kurihara et al., 2000).

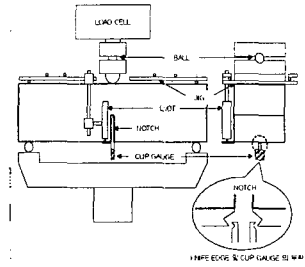


그림 1 3점 휨 시험장치

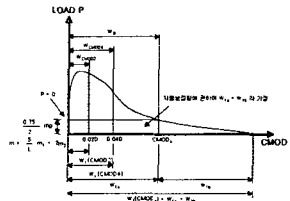


그림 2 파괴에너지의 산정

3. 팽창 콘크리트의 파괴특성 시험

본 시험에 사용된 팽창재는 K형 CSA계 팽창재를 사용하였으며, 시험에 사용된 배합은 표 1과 같고, 불리딩의 영향을 피하기 위해 물-시멘트비는 40%로 결정하였다. 팽창재 혼입량은 시멘트 중량의 10%로 하였다. 강섬유는 0.55×0.47×30mm의 hooked type을 사용하였으며, 전체 체적의 0%, 1%, 2%를 혼입하였고, 섬유의 뭉침 현상 방지를 위해 펄라닌계 유동화제를 0.15%를 첨가하여 혼합하였다. 양생조건은 습윤양생을 기본으로 하였다(김영균, 2003).

팽창을 측정시험을 통해 팽창콘크리트의 팽창특성을 파악하였다. 팽창율은 무구속 공시체에서의 자유팽창율을 조사하였으며, 자유팽창을 측정을 위해 75×100×410mm의 크기의 공시체를 제작하였다. 재령 2일째에 탈형하였으며, 20±2 °C의 양생온도를 유지하면서 매립형 게이지를 사용하여 재령에 따른 팽창율을 측정하였다.

팽창 반응은 재령 5일 정도까지 활발하고 이후로는 팽창이 완만하게 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 팽창재의 특성을 적절히 활용하기 위해서는 초기재령에서의 양생 관리가 중요하다고 판단된다. 그림 3에서와 같이 팽창재를 함유할 경우에는 보통콘크리트보다 많은 변형을 일으키는 것을 볼 수 있다. 이처럼 체적 팽창을 철근이나 섬유보강 등의 다양한 내적 구속조건을 통해 매트릭스에 화학적 프리스트레스에 의

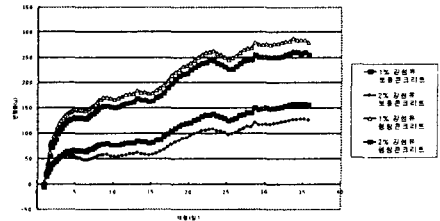


그림 3 강섬유 혼입량 변화를 통한 자유 팽창율 측정 결과

표 1 콘크리트 배합표

시편종류	구분	W/(C+E) (%)	E/(E+C) (%)	단위량 (kg/m ³)					
				W	C	E	G	S	F
보통콘크리트		40	0	220.0	550.0	0	646	840.0	0
섬유보강 보통콘크리트(강섬유 1%)		40	0	220.0	550.0	0	646	814.0	78.5
섬유보강 보통콘크리트(강섬유 2%)		40	0	220.0	550.0	0	646	788.0	157.0
팽창콘크리트		40	9.09	220.0	500.0	50	646	840.0	0
섬유보강 팽창콘크리트(강섬유 1%)		40	9.09	220.0	500.0	50	646	814.0	78.5
섬유보강 팽창콘크리트(강섬유 2%)		40	9.09	220.0	500.0	50	646	788.0	157.0

한 압축응력을 도입시킴으로써 보다 향상된 구조성능을 제공할 수 있다.

파괴특성 시험용 시편은 팽창재 유무의 보통 콘크리트, 팽창재 유무 및 강섬유를 혼입율에 따른 콘크리트로 각각의 경우에 대해 4개씩의 시편을 제작하였다. 시편의 제원은 100×100×400mm으로 지간 길이는 300mm로 하였고, 노치 깊이는 시편 높이의 1/4인 25mm로 하였다. 재령 2일째에 탈형하였으며, 양생온도는 20±2 ℃를 유지시키면서 습윤양생 하였고, 재령 28일까지 양생 후 시험을 수행하였다. 재하 속도는 안정 파괴를 유도하기 위해 하중점의 처짐 속도가 0.001mm/min가 되도록 제어하였다.

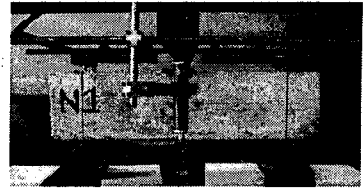


그림 4 휨 시험 시편

4. 팽창 콘크리트의 파괴특성 도출

4.1 파괴에너지 G_F 의 도출

그림 5는 노치를 준 강섬유 보강 콘크리트 휨 부재의 대표적인 3점 휨시험 결과로서 하중-처짐 침하중-균열개구변위의 관계를 도시하였다.

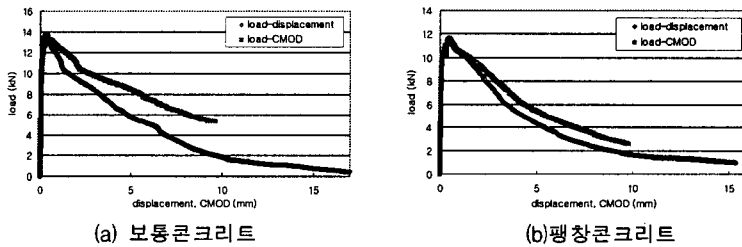


그림 5 노치를 준 강섬유 콘크리트(강섬유 2%)의 하중-처짐 및 균열개구변위 관계

표 2 초기균열하중

구분	강섬유 혼입률	균열하중 (kN)
보통 콘크리트	1%	7.603
	2%	10.066
팽창 콘크리트	1%	7.580
	2%	11.494

팽창재가 혼입되었을 경우, 초기 균열을 유발하는 하중이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 강섬유 혼입량에 따른 화학적 프리스트레스 도입 효과를 검토하면, 보통 콘크리트의 경우에는 강섬유 혼입률이 1%에서 2%로 증가한 경우에 균열하중이 32% 증가하였으나, 팽창콘크리트에서는 52%가 증가하였다. 그리고 강섬유 2%에서 팽창 콘크리트의 균열하중이 보통 콘크리트 보다 14% 향상된 것을 확인할 수 있다. 그러나, 1% 강섬유 혼입 콘크리트의 경우에 팽창콘크리트가 보통 콘크리트와 거의 같은 균열하중을 보였는데, 이는 내부 구속에 의해 충분한 화학적 프리스트레스가 도입되지 않은 것으로 판단되며, 화학적 프리스트레스를 확실히 도입하기 위해서는 확실한 구속효과가 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 3점 휨 시험 결과를 바탕으로 부재 높이를 D라고 할 때 CMOD가 0.02D, 0.04D에 이를 때, 그리고 시편 파단시의 파괴에너지를 산출하였다. 화학적 프리스트레싱이 확실히 도입된 강섬유 혼입률 2%에서의 시험결과를 살펴보면, 전반적으로 약간의 파괴에너지가 증가했으나 균열하중 만큼의 차이는 보이지는 않으며, 파단시 파괴에너지는 3%정도 증가를 보였다.

표 3 강섬유 보강 보통 및 팽창 콘크리트 휨 부재의 파괴에너지 (단위 : kN/mm)

구분 시편	강섬유 혼입 1%			강섬유 혼입 2%		
	T_{CMOD2}	T_{CMOD4}	G_F^{CMOD}	T_{CMOD2}	T_{CMOD4}	G_F^{CMOD}
보통 콘크리트	1.2503	2.3233	6.1728	1.6161	2.7626	8.3775
팽창 콘크리트	1.1620	2.0172	3.9931	1.9369	3.6185	8.6525

4.2 인장연화곡선의 도출

3점 휨 시험 결과, 하중-균열개구변위 (CMOD) 관계를 이용하여 다직선 근사해석법을 통해 인장연화곡선을 도출하였다. 이후 결정된 인장연화곡선을 바탕으로 해석을 통해 하중-변위 관계를 역으로 도출하여 시험 결과와 비교하였다.

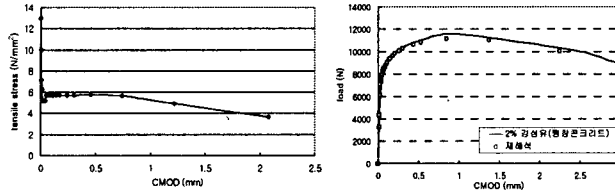


그림 6 강섬유 2% 혼입 팽창콘크리트의 인장연화곡선과 재해석 결과 비교

5. 결 론

본 연구에서는 팽창재에 의한 화학적 프리스트레스가 도입된 강섬유 보강 콘크리트의 파괴거동 특성을 파악하기 위해서 노치가 있는 휨부재의 3점 휨시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강섬유 혼입량에 따른 화학적 프리스트레스 도입량의 변화를 검토한 결과, 팽창 콘크리트가 보통 콘크리트에 비해서 강섬유 혼입량의 증가에 따른 균열하중 및 파괴에너지의 증가량이 컸으며, 콘크리트 부재에서 화학적 프리스트레스를 도입하기 위해서는 확실한 구속이 필요함을 확인하였다.
2. 3점 휨 시험 결과와 유한요소 해석이 포함된 다직선 근사해석법을 사용하여 강섬유 보강 팽창 콘크리트의 인장연화곡선을 도출하였으며, 도출된 인장연화곡선으로 재해석을 수행하여 화학적 프리스트레싱이 도입된 강섬유 보강 콘크리트의 균열거동을 해석하였다.
3. 향상된 재료적 성능을 가진 화학적 프리스트레싱이 도입된 강섬유 보강 콘크리트에 대하여 파괴특성을 규명하였고, 실험을 통해 얻어진 인장연화곡선 등을 적용하여 균열 및 극한거동을 예측할 수 있음을 확인하였으며, 이러한 기법을 활용하여 신재료의 적용성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2002-041-D00506)에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영균 (2003) 화학적 프리스트레스가 도입된 강섬유보강콘크리트의 균열저항성능 평가에 대한 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
2. Kitsutaka, Y. (1995) Fracture parameters for concrete based on poly-linear approximation analysis of tension softening diagram, Wittmann, FH, editor. *Fracture mechanics of concrete structures*. AEDIFICATIO Publishers, pp. 199-208.
3. Kitsutaka, Y. and Uchida, Y. (2002) Standard Test Method for Fracture Property of Concrete, *Concrete Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 8-15.
4. Kurihara, N., Kunieda, M., Kamada, T., Uchida, Y., and Rokugo, K. (2000) Tension Softening Diagrams and Evaluation of Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 235-245.