

화학적 프리스트레스가 도입된 모르타르의 파괴특성에 관한 연구

A Study on Fracture Characteristics of Chemically Prestressed Mortar

안 중 길* 심 별** 송 하 원*** 변 근 주**
Ahn, Jung Kil Shim, Byul Song, Ha Won Byun, Keun Joo

ABSTRACT

In this paper, a study on fracture characteristics of chemically prestressed mortar with addition of expansive additives was carried out. Uni-axial tension tests with reinforced mortar specimen restrained by embedded reinforcing bar and three point bending tests with notched steel fiber reinforced beams were carried out to verify the characteristics of the cracking behavior, the tension stiffening effect due to bond between rebar and mortar, and fracture characteristic. Tension stiffening curve for the chemically prestressed mortar was obtained from uni-axial tension test. And increased fracture energy due to the chemical prestress was also obtained from bending test and tension softening curve for chemically prestressed mortar was also obtained.

1. 서론

콘크리트는 낮은 인장강도로 인하여 취성 파괴와 더불어 균열의 생성 및 성장을 억제하기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 콘크리트와 모르타르에는 경화 및 건조 수축, 수화열에 의한 온도응력 등으로 인하여 균열이 발생할 수 있는데 이러한 균열을 방지하기 위한 방법 중에 하나로 팽창재를 첨가하는 방법이 사용되고 있다. 현재 팽창재의 이용에 대한 연구는 수축 보상 뿐만 아니라 팽창을 부재 내부의 강재 등으로 구속하여 화학적 프리스트레스에 의한 압축응력을 도입시켜 콘크리트의 인장강도의 부족을 개선하는 것에까지 확장되어 가고 있다.

팽창콘크리트는 국소화의 진행이 어려우며 변형능력이 크다고 알려져 있는데, 이를 통해 균열 발생 이후의 연화영역이 보통 콘크리트와 다를 수 있다는 생각을 할 수 있다. 본 연구에서는 철근에 의해서, 그리고 강섬유에 의해 내부구속이 이루어진 경우에 대한 팽창 모르타르의 파괴특성 시험을 통해 화학적 프리스트레스가 도입된 경우의 인장경화특성, 인장연화특성, 파괴에너지를 도출하였다.

2. 모르타르의 파괴특성

2.1 인장경화특성과 모르타르의 인장경화모델

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

2.3 다직선 근사해석법을 통한 인장연화특성 도출

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 et al. (1995)이 제안한 것으로 시험을 통해 얻은 하중-변위 또는 하중-CMOD 곡선을 기초로 하여 가상균열 모델을 통한 역해석 방법을 통해 인장연화곡선을 추정하는 방법으로 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.

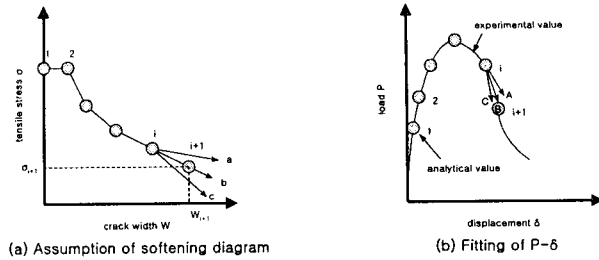


그림 3 다직선 근사해석법

3. 파괴특성 시험

3.1 시험 재료

본 시험에 사용된 팽창재는 일본에서 제조·시판되고 있는 K형 CSA계 팽창재를 사용하였으며 팽창재의 화학조성은 표 1과 같다.

표 1 CSA계 팽창재의 화학성분 및 조성

Ignition loss (%)	Insol (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	합계	F-CaO
1.0	1.4	4.0	10.0	1.2	52.0	0.6	28.3	98.5	16.0

시험에 사용된 배합은 표 2와 같다. 강섬유는 0.4×0.5×30mm의 indent shape type을 사용하였고 전체 체적의 1%를 혼입하였으며, 섬유의 뭉침현상 방지를 위해 멜라닌계 유동화제를 0.15% 첨가하였다.

표 2 시험에 사용된 모르타르 배합

시편종류	구분 (%)	W/(C+E) (%)	E/(E+C) (%)	단위량 (kgf/m ³)				
				W	C	E	S	F
보통모르타르		40	0	356.0	891.0	0	891.0	0
팽창모르타르		40	10	356.4	801.9	89.1	891.0	0
섬유보강 보통모르타르		40	0	356.0	891.0	0	891.0	78.5
섬유보강 팽창모르타르		40	10	356.4	801.9	89.1	891.0	78.5

3.2 인장경화특성 시험

그림 4와 같이 100×100×1000mm의 형태의 철근모르타르 봉 시편을 제작하였고 재령 2일째에 탈형 하였으며 양생온도는 20±2℃를 유지시키면서 재령 28일까지 습윤양생 시킨 후 시험을 수행하였다. 또한 시험시에는 수분에 의한 영향을 최소화하기 위한 목적으로 시편 전체에 구리스를 도포하였다. 가력 장비로는 변위 제어가 가능하며 50 tonf의 하중 재하능력과 75mm의 변위량을 가지고 있는 Instron 모

델 1333을 사용하였고 0.01mm/min의 속도로 하중을 재하 하였으며 시편의 양 단부에 설치된 LVDT를 이용하여 일축인장시험 수행시 길이변화를 측정하고 평균변형율을 산출하였다.

3.3 파괴특성 시험

팽창재의 혼입 유무를 변수로 노치를 준 섬유보강된 모르타르 보 시편을 제작하였다. 제원은 그림 6에 나타내었다. 재령 2일째에 탈형하여 양생온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지시키면서 재령 28일까지 습윤양생 시킨 후 시험을 수행하였다. 시험은 3점 휨 시험을 수행하였으며 하중 재하 단계에 따라 클립 게이지(clip gauge)를 이용하여 균열개구변위(crack mouth opening displacement, CMOD)를 측정하였다. 또한 섬유보강이 이루어진 경우 변형량이 커서 클립게이지만으로는 그 측정이 곤란하므로 LVDT를 통해 처짐도 같이 측정하였다. 가력장비는 인장경화특성 시험에서 사용된 Instron 모델 1333을 사용하였고 재하 속도는 안정 파괴를 유도하기 위해 하중점의 처짐 속도가 0.06mm/min가 되도록 제어하였으며, 하중-CMOD 관계를 통해 인장연화특성 및 파괴에너지를 도출하였다.



그림 5 일축인장시험

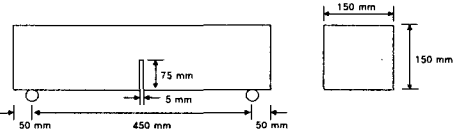


그림 6 강섬유보강 휨 부재의 형상

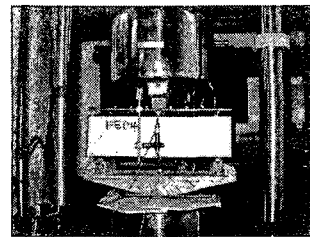


그림 7 파괴특성 시험

4. 파괴특성 시험 결과의 분석

4.1 화학적 프리스트레스의 추정

재령에 따른 변형을 측정을 통해 변형율의 절대값의 차이를 사용하여 팽창모르타르로 제작된 봉 부재에 작용하는 화학적 프리스트레스의 크기를 추정하였다. \bar{A}_s 은 철근의 평균단면적을, \bar{A}_m 은 모르타르부의 평균단면적을 나타낸다.

$$f_{cp} = \epsilon_s \times E_s \times \frac{\bar{A}_s}{\bar{A}_m} \quad (5)$$

$$= (169 \times 10^{-6}) \times (2.03 \times 10^6) \times 0.028 \approx 10\text{kgf/cm}^2$$

4.2 일축인장시험

그림 11은 철근모르타르 봉 시편의 일축인장 시험을 바탕으로 모르타르부가 부담하는 응력-평균변형율 관계의 대표적인 것을 나타낸 것이다. 시험 결과 팽창모르타르 봉 부재는 보통모르타르 봉 부재에 비해 초기균열 발생 응력이 약 33kgf/cm^2 증가하며, 초기 균열 발생 이후에 추가적인 균열 발생이 억제됨을 알 수 있었다. 또한 Okamura and Maekawa (1991)와 Shawky (1994)의 인장경화모델을 이용하여 모르타르 부재의 시험 결과에 대한 적용성을 검토하였는데 여기서 Shawky의 모델의 계수 α 에 사용되는 화학적 프리스트레스의 크기는 일축인장 부재의 팽창을 측정을 바탕으로 하여 산정한 값인 10kgf/cm^2 와 일축인장시험 결과에서 보통모르타르 봉 부재와 팽창모르타르 봉 부재의 인장응력 증가분인 33kgf/cm^2 를 각각 사용하였다.

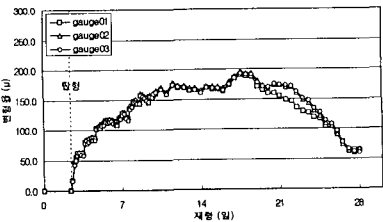
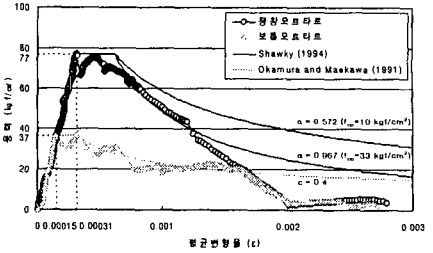


그림 8 팽창모르타르 봉 시편 내부 철근의 재령에 따른 팽창 변형율

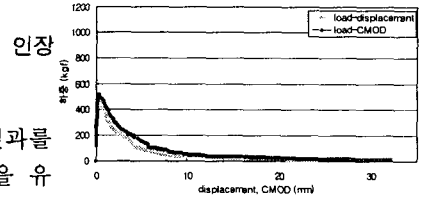
인장경화모델은 모르타르 봉 부재의 거동을 비교적 잘 예측하고 있지만 실제 시험 결과에서는 균열 발생 이후 응력의 저하 정도가 더 크게 나타나며, 팽창모르타르 봉 부재의 경우 인장경화효과가 작게 나타나고 있다. 하지만 적용성 검토에는 콘 크리트에 대한 인장경화모델을 사용하였으므로 팽창재 혼입시 인장경화효과에 대한 명확한 결론을 내리기 위해서는 실제 콘 크리트에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.



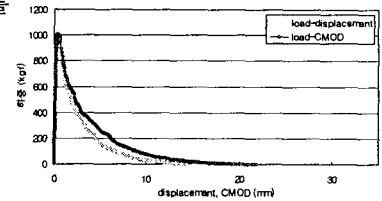
4.3 파괴특성 시험

4.3.1 파괴에너지 G_F

노치를 준 섬유보강 모르타르 보 시편의 대표적인 휨 시험 결과를 다음과 같이 나타내었다. 팽창재가 혼입되었을 경우 초기 균열을 유발하는 하중이 증가하는 것을 확인할 수 있으며 3점 휨 시험 결과를 바탕으로 부재 높이를 D 라고 할 때 CMOD가 $0.02D$, $0.04D$ 에 이를 때, 그리고 시편 파단시의 파괴에너지를 산출하였다.



(a) 보통모르타르 (시편 2의 경우)



(b) 팽창모르타르 (시편 1의 경우)

표 3 강섬유보강 모르타르 휨 부재의 파단시 CMODc (단위 : mm)

구분 시편	강섬유보강 보통모르타르	강섬유보강 팽창모르타르
1	36.67	21.86
2	32.13	24.94
3	43.67	28.82

그림 10 강섬유보강 모르타르 보 시편의 휨 시험 결과

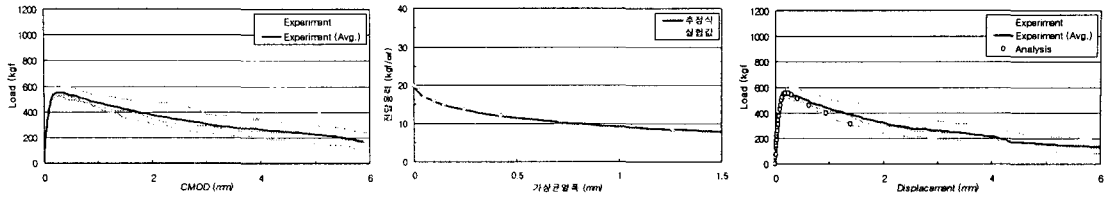
표 4 강섬유보강 보통모르타르 휨 부재의 파괴에너지 G_F (단위 : kgf/cm)

구분 시편	강섬유보강 보통모르타르			강섬유보강 팽창모르타르		
	CMOD(0.3cm)	CMOD(0.6cm)	CMODc(mm)	CMOD(3mm)	CMOD(6mm)	CMODc(mm)
1	0.9518	1.5738	3.5031	1.3530	1.9986	2.7706
2	0.7478	1.1158	2.0146	1.1600	1.6235	2.5469
3	0.7655	1.2180	2.5494	1.2481	1.8999	3.1622
평균	0.8217	1.3025	2.6890	1.2537	1.8407	2.8266

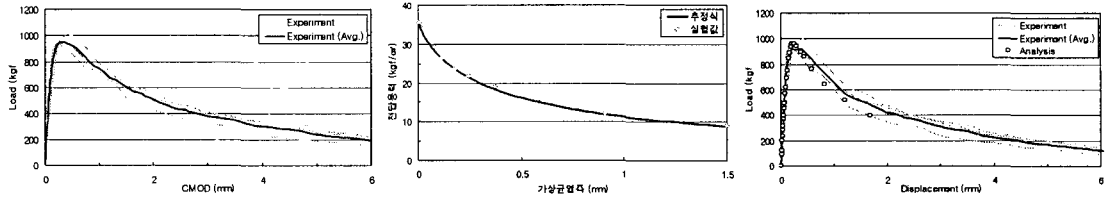
4.3.2 섬유보강 모르타르 보 시편의 인장연화곡선

3점 휨 시험 결과 중 하중-균열개구변위 (CMOD) 관계를 이용하여 다직선 근사해석법을 통해 인장연화곡선을 결정하였다. 이후 결정된 인장연화곡선을 바탕으로 해석을 통해 하중-변위 관계를 역으로 도출하여 시험 결과와 비교하였다. 그림 12에는 균열 발생 이후의 연화 구간에 대한 인장연화곡선을 나타내었으며 식 (6)과 같은 추정식을 사용하여 표현하였다. ω 는 균열개구변위 (mm), f_t 는 인장강도 (kgf/cm²), a, b 는 상수이다.

$$f(\omega) = f_t \frac{1}{1+(a \times \omega^b)} \quad (6)$$



(a) 하중-CMOD 관계 (b) 인장연화곡선의 결정 (c) 역해석된 하중-변위관계
 그림 11 강섬유보강 보통모르타르 보 시편의 인장연화곡선의 결정



(a) 하중-CMOD 관계 (b) 인장연화곡선의 결정 (c) 역해석된 하중-변위관계
 그림 12 강섬유보강 팽창모르타르 보 시편의 인장연화곡선의 결정

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근으로 내부 구속이 이루어진 철근모르타르 봉 부재를 팽창재의 혼입 유무를 변수로 하여 제작하고 일축인장시험을 수행한 결과, 팽창모르타르 봉 부재는 보통모르타르 봉 부재와 비교하였을 때 화학적 프리스트레스가 도입되어 초기 균열을 유발하는 하중이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 철근모르타르 봉 부재의 일축인장시험 결과를 통해 인장경화특성을 도출하였으며, 철근과 콘크리트부의 부착특성을 반영하기 위해 제안된 Okamura and Maekawa (1991)의 콘크리트의 인장경화모델과 Shawky (1994)의 팽창콘크리트의 인장경화모델에의 적용성을 검증하였다.
- 3) 팽창재의 혼입 유무를 변수로 노치를 준 강섬유보강 모르타르 보 부재를 제작하고 3점 휨 시험을 수행하였으며 강섬유보강 팽창모르타르 부재는 강섬유보강 보통모르타르 부재와 비교하였을 때 화학적 프리스트레스의 도입으로 초기 균열을 유발하는 하중이 증가하였으며 파괴에너지가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 3점 휨 파괴시험 결과의 역해석을 통해 강섬유보강 보통모르타르 부재와 강섬유보강 팽창모르타르 부재의 인장연화곡선을 도출하였다.

참고문헌

1. Kitsutaka, Y. and Uchida, Y. (2002), "Standard Test Method for Fracture Property of Concrete", *Concrete Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 8~15.
2. Kitsutaka, Y., Uchida, Y., Kaneko, Y., Kanda, T., Fukuyama, H., and Nakamura, S. (2002), "Test Method of Fracture Properties of Concrete", *The First fib Congress 2002*, pp. 260~275.
3. 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.
4. Sahamitmongkol, R. and Kishi, T. (2002), "Flexural Behavior of Fiber-Reinforced Expansive Mortar", *57th JSCE Annual Conference*, Hokkaido, JAPAN, V-509.
5. 石村隆敏, 丸山譽史, 細田暁, 岸利治 (2001), "膨張コンクリートのテンションステイフィング効果に関する実験的研究", *コンクリート工學年次論文集*, Vol. 23, No. 3, pp. 583-588.