

무근 콘크리트 인장연화응답의 실험적 연구

Experimental Study for Tensile Softening Response of Plain Concrete

이 상 근* 강 태 경** 송 영 철*** 권 용 길**** 한 상 훈****
Lee, Sang Kuen Kang, Tae Kyung Song, Young Chul Kwon, Yong Gil Han, Sang Hoon

ABSTRACT

In this paper a large scale direct tension test of plain concrete is represented. Two independently controlled actuators were used to ensure a homogeneous tensile field and to avoid secondary flexural stresses. Fracture energies evaluated by a classical prediction equation and this test are compared. The result indicated that the classical prediction equation is not adequate to predict the fracture energy of large sized specimens. From this test, it was determined that the fracture energy obtained from large scale direct tension tests is significantly higher than the one obtained in wedge splitting tests on laboratory sized specimens. But the tensile strength was about half the value determined from splitting tensile strength test with cylindrical specimens.

1. 서 론

철근 및 프리스트레스 콘크리트에 대한 일반 설계는 일축 압축 및 인장하의 무근콘크리트가 응력-변형률 곡선중 하강부분을 갖고 있다는 암시적인 가정에 기초하고 있다. 그러나, 콘크리트 구조물의 보다 합리적인 설계를 위해서는 응력-변형률 곡선의 상승부분과 하강부분 모두를 알아야 할 필요가 있다. 하강부분 모양의 명시적인 지식이 대부분의 평범한 설계에서 반드시 필요한 것은 아니지만, 지진처럼 특별한 하중을 고려할 경우 정확하고 합리적인 설계를 위해서는 완전한 전체 응력-변형률 곡선이 필요시 된다¹⁾. 따라서, 본 연구는 콘크리트의 일축 파괴특성 중 일축 인장하의 인장연화응답 특성을 명시적으로 제시하기 위해 국내 최초로 대형(lage scale) 직접인장연화시험을 수행하였다.

* 정회원, 한전전력연구원 원자력연구실 선임연구원

** 정회원, 한전전력연구원 원자력연구실 연구원

*** 정회원, 한전전력연구원 원자력연구실 책임연구원

**** 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정

***** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

2. 시편제작 및 물성

본 연구에서 사용한 시편은 지금까지 수행해 온 외국의 직접인장시험 관련연구들²⁻⁴⁾에서 다루었던 시편들과 비교할 때 가장 큰 치수의 대형시편에 해당할 것이다(그림 1). 시편 치수는 1400×1100×250 mm 이다. 그림 4에서와 같이 상부와 하부에 두 개의 폭 5mm, 깊이 150mm의 노치(notch)를 두었고 노치 선단부분은 썸기모양으로 처리하여 단 하나의 주균열이 노치 선단으로부터 발생하도록 유도하였다. 부가적으로 시편의 좌우 측면에 마주보는 노치의 선단에서 선단까지 폭과 깊이가 각각 20mm인 측면 홈(side groove)을 두었다. 따라서 인장파괴가 일어나는 순간면의 치수는 210×800mm이고, 단면적은 1680cm²(비교차원에서 관련연구 중 최고의 대형시험을 수행했던 Slowik³⁾의 경우는 1145cm²) 이다. 그림 2는 시편 형상 및 치수 그리고 시험장치를 보여준다. 시편과 유압가력기(actuator)를 연결하기 위하여 두 개의 평행한 강판을 콘크리트 시편에 앵커로 연결하였다. 양 단부의 강판이 정확하게 서로 평행하도록 보장하기 위해 시편제작시 변형성이 매우 작은 강제거푸집을 사용하였다. 양 단부에 300mm(매입길이) LA형 앵커(D24) 4개, 200mm L형 앵커(D12) 16개를 강판과 콘크리트를 연결하기 위해 콘크리트 타설전 거푸집에 장착하여 매립하였다. 앵커의 매립길이와 위치는 유한요소해석을 통해 앵커로부터 전달되는 인장력이 시편 중앙을 중심으로 좌우 약 300mm 위치에서부터 거의 균일한 인장응력장을 형성하도록 설계하였다. 콘크리트 배합은 물-결합재비(W/B) 44%, 잔골재율(S/a) 43.6% 이고, 골재는 굵은골재 최대 치수 20mm의 부순돌을 사용하였다. 판형시편과 함께 재료의 물성평가를 위해 다수의 원주형공시체(φ10×20)가 제작되었다.

시편은 91일 이후 시험되었고, 원주형 공시체를 이용한 물성평가에서 91일 압축강도는 359kgf/cm², 인장강도는 35kgf/cm², 그리고 탄성계수는 2.4×10⁵kgf/cm²로 측정되었다.

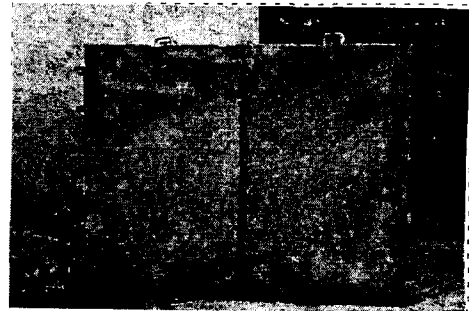


그림 1 무근콘크리트 판형시편

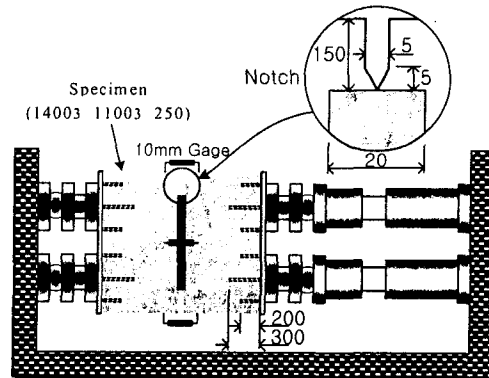


그림 2 직접인장시험 장치(INSTRON)

3. 시험장비

독립적으로 제어가 가능한 두 개의 63tf 유압가력기(INSTRON)를 사용하여 시편 상부와 하부의 CMOD가 시험 전반에 걸쳐 일정하게 유지되도록 조절하였다. 상부와 하부 그리고 좌우 측면의 CMOD를 측정하기 위해 민감도 10⁻³/mm의 10mm LVDT(Tokyo Sokki) 4개를 중앙에 부착하였고, 유압가력기를 조절하기 위한 feedback 신호로도 활용하였다. 부가적으로, 노치 선단부위의 파괴진행대에서 발생하는 콘크리트 내부의 미세균열을 탐지하기 위해 한쪽 측면 하부 노치 주위에 6개의 AE 센서를 활용하였다.

일반적으로 무근 콘크리트 특히 고강도 콘크리트에 대한 완전한 전체 하중-CMOD 곡선을 얻기 위

해서는 실험장치 및 기법에 있어서 많은 주의를 필요로 한다. 왜냐하면 실험시스템과 시편간의 상호작용 때문에 하중-CMOD곡선 중 하강부분을 표현하기 매우 어렵기 때문이다. 실험장비의 영향은 장비의 강성, 시스템의 frequency 응답, 시편의 길이와 직경, 콘크리트의 강도, 재하비(the rate of loading), 그리고 재료 고유의 취성성질 등에 의존한다. 따라서, 하강곡선을 그리기 위한 접근으로 서보(servo) 조절이 가능한 closed-loop 실험시스템을 사용 것이 가장 이상적이다. Closed-loop 실험시스템은 시편으로부터 임의의 출력 신호를 선택하고 이 신호를 하나의 독립적인 변수로 하여 유압가력기를 연속적으로 조절할 수 있다. 만일 어떤 차이(difference)가 존재할 경우 임의 error신호가 발생되고, 이 신호는 극성과 신호의 차이를 최소화하는 방향과 크기로 재하판의 움직임을 수정한다⁵⁾.

4. 시험결과 및 분석

콘크리트 대형 판형시편에 대해 시험 전반에 걸쳐 하나의 일정한 개구변위를 보장하면서 직접인장시험을 수행하였다. 시험은 closed-loop 시스템을 기반으로 변위제어방식을 사용하였고, 재하속도는 $0.1 \mu\text{m/sec}$ 를 일정하게 유지하였다. 그림 3은 압축강도 359kgf/cm^2 의 판형시편에 대한 실험결과를 제시하는 것으로 완전한 하중-CMOD 곡선을 보여주고 있다. 그림 4의 하중-시간 곡선은 그림 5와 같이 상부와 하부의 CMOD가 정확히 일치하는 가운데 얻어진 것으로 하중이 상부와 하부 노치의 CMOD가 일치성을 유지하도록 적절히 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 두 개의 유압가력기가 시편에 부착된 각각의 상응 LVDT로부터의 피드백 신호에 의해 조절되었음을 보이는 것이다.

주지할 것은 여기서의 실험결과는 예비실험의 일환으로 하나의 시편에 대해 수행한 것이므로 명확한 결론을 내리기는 어렵다. 그러나, Slowik³⁾의 실험에서 상·하부 CMOD의 완전한 일치는 보이지 못하였지만 본 연구의 경우 완벽한 일치를 구현하였으며, 상·하부 노치에서 CMOD의 증가 속도가 비선형성이 아닌 일차 직선형태로 제어함으로써 보다 안정된 연화곡선을 얻을 수 있었다(그림 5). 또한, 크기효과 법칙(Size Effect Law)⁶⁾의 배경 내에서 설명되는 몇 가지 흥미있는 결과를 도출하였다. 먼저 파괴에너지 측면에서 Bazant와 Oh⁷⁾가 제시한 콘크리트 파괴에너지 예측식인 식(1)을 이용하여 평가한 파괴에너지(\bar{G}_F)와 직접인장시험을 통해 실제로 평가된 파괴에너지(G_F)를 비교하였다.

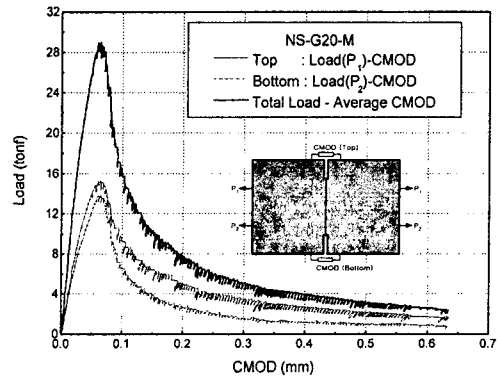


그림 3 직접인장하의 하중-CMOD 곡선

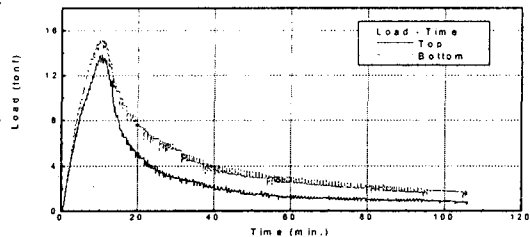


그림 4 하중-시간 이력

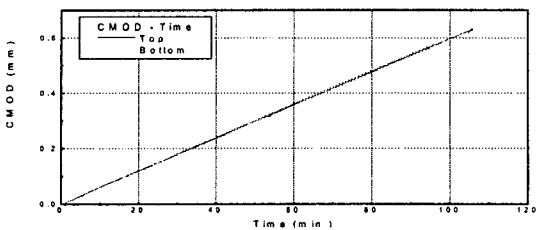


그림 5 CMOD-시간 이력

$$\widetilde{G}_F \approx (2.72 + 0.0214f'_t)f_t'^2 \frac{d_a}{E} \quad (1)$$

여기서, f'_t 는 콘크리트 인장강도(psi), E 는 탄성계수, d_a 는 사용된 굵은골재 최대치수이다. 식(1)에 원주형 공시체로부터 얻은 물성값($f'_t=498\text{psi}$, $E=3.41 \times 10^6\text{psi}$)을 대입하여 얻은 파괴에너지 예측값 (\widetilde{G}_F)은 0.765 lb/in(134 N/m)이었으나 그림 5의 실제 직접인장시험으로부터 계산된 파괴에너지(G_F)는 1.477 lb/in(256 N/m)이었다. 따라서, 본 연구의 대형시편이 갖는 인장파괴에너지는 대부분 소형시편의 실험결과들을 기반으로 제시된 식(1)이 제시하는 파괴에너지보다 약 두배 정도 큰 것으로 나타났다. 이는 Slowik³⁾이 비슷한 강도수준의 콘크리트를 대상으로 소규모 썬기형 쪼갬시험(wedge splitting test)에서 얻은 파괴에너지(160N/m)³⁾와 비교할 때 더욱 명확하게 알 수 있다. 그러나, 대형시편을 이용하여 직접인장시험에서 얻은 인장강도(17kg/cm²)는 오히려 약 절반 가까이 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 Slowik³⁾과 Carpinteri⁴⁾의 실험에서도 동일한 결과를 제시하였다.

5. 결 론

본 연구는 하나의 무근콘크리트 대형시편(1400×1100×250)을 이용하여 직접인장시험을 수행하였다. 두 개의 유압가력기를 독립적으로 운용하고 closed-loop 시스템을 적용하여 균열발생 후 부착적인 휨 응력 발생을 제거한 완전한 하중-CMOD곡선을 도사하였다. 크기효과법칙에 기인하여 파괴에너지가 기존 소형시편들을 대상으로 한 실험결과에 비해 매우 크게 나타났고 기존 파괴에너지 예측식에 의한 결과가 여기서의 대형시편 실험결과와 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 그러나 인장강도는 오히려 작게 평가되었으며, 이는 기존 연구들과 일치하고 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design," *Journal of Structural Division*, Vol. 104, No. ST11, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
2. Mier, J. G. M. van, "Fracture Processes of Concrete - Assessment of Material Parameters for Fracture Models," CRC press, Inc., 1997.
3. Slowik, V., Saouma, V. E. and Thompson, A., "Large Scale Direct Tension Test of Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 6, pp. 945-954, 1996.
4. Carpinteri, A. and Ferro, "Size Effects on Tensile Fracture Properties : A Unified Explanation Based on Disorder and Fractality of Concrete Microstructure." *Materials and Structures*, Vol. 27, pp. 563-571, 1994.
5. Shah, S. P., Gokoz, U. and Ansari, F., " An Experimental Techniqud for Obtaining Complete Stress-Strain Curves for High Strength Concrete," *Cement, Concrete, and Aggregates*, CCAGDP, Vol. 3, No. 1, pp. 21-27, 1981.
6. Bazant, Z. P., "Size Effect in blunt fracture: Concrete, Rock, Metal," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 110(4), pp. 518-535, 1984.
7. Bazant, Z. P. and Oh, B. H., "Crack Bend Theory for Fracture of Concrete", *Materials and Structures Research and Testing*, 16(93), pp. 155-177, 1983.