

콘크리트 삼점 휨시험편의 성장하는 균열에 대한 저항곡선

연정흠¹⁾*

¹⁾인하대학교 토목공학과

(2001년 5월 7일 원고접수, 2001년 10월 8일 심사완료)

Resistance Curves of Propagating Cracks for Concrete Three-Point Bend Specimens

Jung-Heum Yon¹⁾*

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received May 7, 2001, Revised October 8, 2001)

ABSTRACT

From measured responses of concrete three-point bend tests, the average values of the responses have been calculated. The fracture behavior of continuously propagating concrete crack has been analyzed from the average responses. The experimental parameters of this study were the initial notch sizes of 25.4 mm and 6.4 mm and the processing times of 2,000 sec. and 20 sec. The different notch sizes were used for the effects of the size of fracture process zone and specimen geometry, and the processing times for those of initial creep. However, the load-point displacement rate in this study did not affect the experimental responses seriously.

The average loads were calculated from the average external work of a series of tests, and average crack lengths were determined by using strain gages. Before the peak load, the resistance curve could be determined from the size of fracture process zone, but unstable crack propagation of 88 mm occurred at the load-point displacement of 0.088~0.154 mm after the peak load. The average fracture energy density $G_F^{ave} = 115$ N/m occurred during the unstable crack propagation. The fracture process zones were fully developed at the crack length of 111 mm, and the sizes of fracture process zone for initial notches of 25.4 mm and 6.4 mm were 86 mm and 105 mm, respectively. Average fracture energy densities of the resistance curves after full development of fracture process zone were 229 N/m for the initial notch of 25.4 mm and 284 N/m for 6.4 mm. The values were more than twice of G_F^{ave} .

Keywords : concrete, fracture mechanism, three-point bend test, propagating crack, resistance curve

1. 서 론

콘크리트의 인장 및 전단거동의 중요성이 증가함에 따라 콘크리트의 파괴특성을 측정하기 위해 많은 실험이 시도되었으나, 대부분의 삼점휨실험들은 초기균열의 성장이 시작되는 순간 또는 최대하중에서 파괴특성을 연구하기 위한 것이다. 선형탄성파괴이론이 적용될 수 있는 취성재료의 경우에는 불안정 균열로 성장되기 때문에 초기균열이 성장하는 시점에서 파괴특성이 결정된다. 금속재료와 같이 연성이 상대적으로 큰 경우에는 초기균열단 앞에 소성영역이 형성되어 균열주변의 탄성에너지가 임계값에 이르기 전에는 불안정 균열성장이 발생되지 않는다. 이 경우에는 최대하중에서 유효탄성균열(effective-elastic crack)¹⁾의 개념이 사용될 수 있다. 그러나 콘크리트의 경우에는

초기균열단에서 균열의 성장이 시작된 후에도 최대하중에 이를 때까지 균열의 성장에 대해 하중이 증가하는 안정적인 균열성장을 보이며^{2,3)}, 초기균열단의 앞에 균열폭의 증가에 대해 균열을 가로질러 전달되는 인장응력이 감소하는 영역으로 정의되는 파괴진행대(fracture process zone)를 형성한다.

일반적으로 콘크리트의 균열이 성장하기 위해서는 미소 균열단의 성장에 대한 에너지해방률(energy release rate) G_{lc} 와 균열면-변위(crack opening displacement, COD) w 에 따른 파괴진행대의 파괴에너지율(fracture energy density)³⁾ $G_{FPZ}(w)$ 을 필요로 한다⁴⁾. CEB-FIP Model Code⁵⁾에서 채택하고 있는 가상균열이론(fictitious crack model)⁶⁾의 경우에는 $G_{lc} = 0$ 으로 가정하고, 직접인장실험에서 최대하중 이후의 평균응력-신장의 관계로부터 G_{FPZ} 가 결정된다. 균열띠이론(crack band model)⁷⁾에서는 굵은골재의 최대 크기로부터 결정되는 일정한 폭의 파괴진행대에 대한 평균 변형률이 균열면-변위 대신에 사용된

* Corresponding author

Tel : 032-860-7569 Fax : 032-873-7560

E-mail : jyon@inha.ac.kr

다. 최대하중에서 유효탄성균열을 적용하는 대표적인 이론인 두매개변수이론(two-parameter model)⁸⁾에서는 파괴진행대의 파괴에너지를 $G_{FPZ} = 0$ 이 가정되고, 최대하중에서 파괴진행대 대신에 균열면의 경계응력이 영으로 가정된 유효탄성균열단의 임계 응력확대계수와 초기균열단에서 임계 균열면-변위가 사용된다.

이 연구에서는 연속적으로 성장하는 균열에 대한 파괴에너지를 보다 정확히 이해하기 위해 콘크리트 삼점휨시험의 결과를 분석하였다. 일반적으로 어떠한 재료에 대한 파괴거동의 연구에는 균열의 성장에 따른 에너지소모기구의 분석이 중요하기 때문에 보다 정확한 외부일을 계산하기 위해 하중점-변위가 측정되었다. 콘크리트 삼점휨 시험편에 대한 개개의 실험결과는 편차가 크기 때문에 일련의 실험에 대한 평균 외부일로부터 평균하중이 계산되었다. 변형률 게이지를 사용하여 측정된 균열길이 또한 개개의 실험결과보다는 일련의 실험결과에 대한 평균값을 사용하여 단위면적의 균열형성에 필요한 에너지로 정의되는 저항곡선(resistance curve)이 계산되고, 평균 저항곡선으로부터 균열이 시험편의 위연단에 이를 때까지 파괴거동을 분석하였다.

2. 실험 과정

연속적으로 성장하는 균열의 파괴거동을 연구하기 위해서는 변위가 제어되는 상태에서 시험편이 완전히 파손될 때까지 시험편의 반응이 측정되어야 한다. 이를 위해 재하장치는 최대 하중에 대해 충분한 강성을 가져야 하며, 자료측정장치와 계측기는 충분한 측정률과 정밀도로 시험편의 반응을 측정할 수 있어야 한다. 이를 위해 한계성능이 48.9 kN(5.0 tonf)인 고정장치와 유압식 하중재의 변위가 최대 2.5 m/sec의 속도로 제어될 수 있는 자동실험장치가 사용되었다.

시험편의 반응을 측정하기 위한 자동측정장치는 자료측정장치의 출력전압의 변화 정도에 따라 자동으로 계측기의 출력전압을 시험편의 물리적인 반응으로 변환하여 16개의 계측기에 대해 초당 320개의 여과된 자료를 영구기억장치에 저장할 수 있다. 자동측정장치에 연결된 자료측정장치는 측정률이 250 kHz이다. 하중계는 24 kN (2.5 tonf)의 성능과 12.7 mm의 직경으로 Fig. 1에 있는 하중받침에 고정되었다. 하중받침의 양쪽에 설치된 두 개의 자장변위계(capacitance displacement gage)에 의해 하중점-변위가 측정되었으며, 시험편의 아래연단과 같은 높이의 시험편 양측 측면에 설치된 두 개의 자장변위계는 초기균열의 균열개구변위(crack mouth opening displacement, CMOD)의 측정에 사용되었다.

연속적으로 성장하는 균열의 길이를 측정하기 위해서

Fig. 1과 같이 6개의 변형률 게이지가 위험단면에서 12.7 mm 편심된 위치에 균열의 예상경로를 따라 12.7 mm 또는 25.4 mm 간격으로 부착되었다. 시험편의 위연단에는 시험편의 지간중심에서 25.4 mm 편심되는 위치에 추가의 변형률 게이지가 부착되어 미소균열이 위연단에 이르는 시간이 측정되었다. 이 연구에서 사용된 길이가 10 mm인 변형률 게이지는 절대적인 변형률을 측정하기 위한 것이 아니라 균열의 발생으로 인해 균열경로의 주변에서 변형률의 기울기가 급격히 감소하는 시간을 측정하기 위한 것이다. 파괴진행대 이론에 의한 이 논문의 균열단은 인장응력을 전달할 수 있는 성능이 감소하는 미소균열단의 위치로 정의되며, 미소균열단이 게이지의 위치를 통과하면 변형률의 신호는 감소하게 된다.

이 실험에서 하중은 균열이 시험편의 위연단에 도달하여 하중이 영이 될 때까지 컴퓨터에 의한 변위제어로 약 2000 sec 또는 20 sec 동안 재하되었다. 최대하중 이전의 하중점-변위 또는 CMOD의 신호는 매우 작고 빠른 측정에 많은 잡음(noise)이 포함되어 있어서 재하장치의 제어신호로 적합하지 않기 때문에 재하장치는 하중재에 설치된 변위계(LVDT)의 반응에 따라 제어되었다. 이 경우 고정장치의 변형이 고려되지 않을 수 있으나, 충분한 고정장치의 강성을 확보할 수 있으면 이에 의한 영향을 최소화할 수 있다. 최대하중 이후에 하중점-변위 또는 CMOD의 반응이 제어신호로 사용되는 경우에도 고정장치의 변형을 제어하기 위해서는 매우 정밀하고 빠른 반응속도를 필요로 한다.

시험편에 사용된 콘크리트의 배합비는 단위 중량으로 시멘트 : 잔골재 : 굵은골재 : 물의 비가 1 : 2 : 3 : 0.63이며, 굵은골재의 최대 크기는 6.4 mm이다. 실험 당일의 재령에서 원주형 공시체에 대한 평균 압축강도 및 쪼갬인장강도(splitting tensile strength)는 각각 45.9 MPa(468 kgf/cm²)와 3.93 MPa(40 kgf/cm²)이다. 시험편의 크기는 지간×높이×두께가 508×127×50.8 mm으로 Fig. 1과 같다. 균열이 발생하는 위치를 유도하기 위해 지간중심에는 아

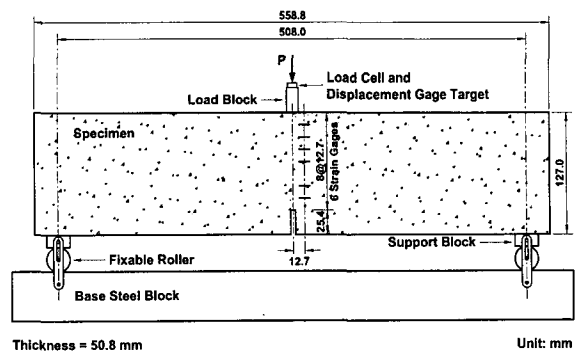


Fig. 1 Configuration of three-point bend test setup

래연단에서 25.4 mm 또는 6.4 mm 길 이의 초기균열이 실험 하루 전에 3 mm 두께의 콘크리트 톱을 사용하여 제작되었다.

3. 실험 결과

실험이 시작되기 전에 시험편에는 100 N(10.2 kgf)의 하중을 수 차례 재하하여 시험편의 강체운동에 의한 변형을 최소화하였다. Fig. 2와 3은 각각 초기균열길이가 25.4 mm와 6.4 mm인 삼점휨 시험편의 측정된 하중과 CMOD의 하중점-변위에 대한 관계이며, 굵은 실선은 실험결과에 대한 평균값이다. 평균하중의 계산에 각 실험에서 측정된 하중의 평균값이 사용되면 각 실험의 최대 하중에 대한 하중점-변위가 일정하지 않기 때문에 평균 하중의 최대값이 여러 변위에서 발생할 수 있으며, 하중의 진동과 변위의 일시적인 감소 등으로 평균하중에 대한 완만한 곡선이 계산되지 않는다. 이러한 이유로 이 연구에서 평균하중 P_i^{ave} 는 같은 하중점-변위 δ_i 에 대한 각 실험에서 측정된 하중의 평균이 아니라 다음과 같이 계산된 외부일 W_i 의 평균값 W_i^{ave} 로부터 다음과 같이 계산되었다.

$$W_i = \int_0^{\delta_i} P d\delta \approx \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i (P_{j+1} + P_j) (\delta_{j+1} - \delta_j) \quad (1)$$

$$P_i^{ave} = \frac{dW_i^{ave}}{d\delta_i} \approx \frac{W_i^{ave} - W_{i-1}^{ave}}{\delta_i - \delta_{i-1}} \quad (2)$$

그러므로 이 연구에서 실험결과 분석에 사용된 평균하중은 평균 외부일을 만족하는 하중이다.

Fig. 2와 3에 표시된 단계 ㉠ 이전의 기울기에 대한 비균열성장 선형탄성 유한요소해석에 의한 탄성계수는 두 초기균열길이 모두에 대해 26 GPa(0.27×10^6 kgf/cm²)로 콘크리트구조 설계기준에 의한 값의 약 90 %이다. 단계 ㉠에서 하중의 기울기는 서서히 감소하기 시작하여 단계 ㉢에 이르면 하중의 기울기는 급격히 감소하게 되고, 최대하중(peak load)에 이르게 된다. 단계 ㉢ 이후 하중은 급격히 감소하나, 단계 ㉤에 이르면 하중의 기울기는 다시 서서히 증가하였다. CMOD의 경우에는 단계 ㉠까지 기울기가 서서히 증가하다가 단계 ㉠ 이후에는 하중점-변위에 비례하며, 단계 ㉠ 이후의 CMOD는 초기균열길이 및 재하속도에 관계없이 일정하였다.

이 논문에 사용된 실험변수는 25.4 mm와 6.4 mm의 초기균열길이 그리고 2000 sec와 20 sec의 실험기간이다. 그러나 Fig. 2와 3의 실험결과는 삼점휨실험에 대해 하중과 하중점-변위 관계에 20~2000 sec의 실험기간은 큰 영향

이 없는 것을 보여준다. Table 1은 각 실험에 대한 결과로 a_o 는 초기균열의 길이이며, 파괴에너지를 G_F^{ave} 은 다음의 식에 의해 계산된 값이다.

$$G_F^{ave} = \frac{[\text{평균 외부일}]}{[\text{균열단면의 면적}]} \quad (3)$$

평균 파괴에너지율은 초기균열길이에 관계없이 2000 sec 동안 실시된 실험에 대해 약 111 N/m(11.3 kgf/m)이며, 20 sec의 실험에서는 약 120 N/m(12.2 kgf/m)이었고, 실험기간이 고려되지 않은 각 초기균열길이에 대한 평균값은 115 N/m(11.7 kgf/m)로 일정하였다.

Fig. 4와 5는 각각 초기균열길이 25.4 mm와 6.4 mm의 삼점휨 시험편에 대한 측정된 하중점-변위의 이력(history)이다. 단계 ㉢에서 하중점-변위의 급격한 증가는 최대하중에서 큰 변형에너지에 의한 불안정 균열성장에 의한 것으로 판단된다. 이 불안정 균열성장은 단계 ㉤에

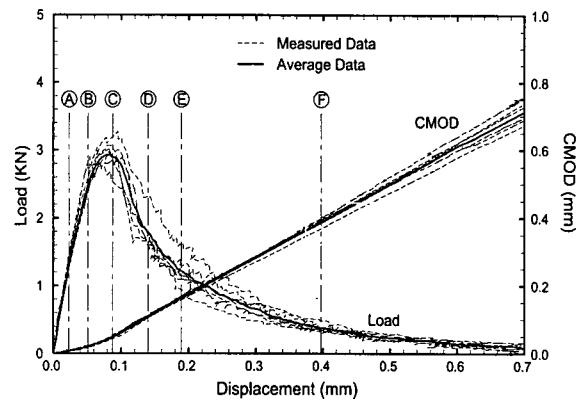


Fig. 2 Measured loads and CMOD's with $a_o = 25.4$ mm

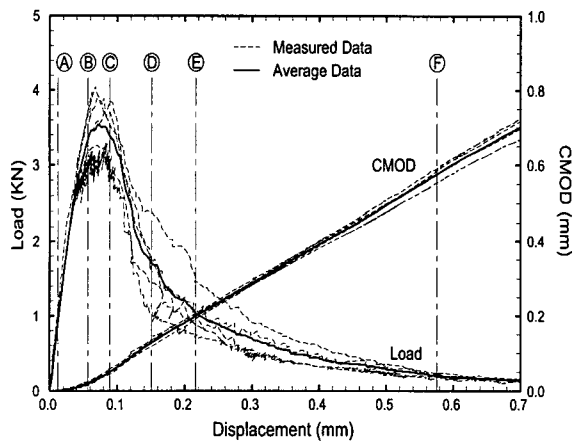


Fig. 3 Measured loads and CMOD's with $a_o = 6.4$ mm

Table 1 Results of concrete three-point bend tests

| a_o | Test # | Period (sec) | Peak load (kN) | Work (N·m) | G_F^{ave} (N/m) |
|---------|--------|--------------|----------------|------------|-------------------|
| 25.4 mm | SL1 | 2,037 | 3.040 | 0.524 | 102 |
| | SL2 | 1,979 | 2.976 | 0.622 | 121 |
| | SL3 | 1,840 | 2.867 | 0.590 | 114 |
| | Ave. | 1,952 | 2.961 | 0.579 | 112 |
| | FL1 | 16.92 | 2.745 | 0.558 | 108 |
| | FL2 | 24.05 | 3.249 | 0.703 | 136 |
| | FL3 | 19.22 | 2.988 | 0.560 | 108 |
| | Ave. | 20.06 | 2.994 | 0.607 | 118 |
| Ave. | | | 2.978 | 0.593 | 115 |
| 6.4 mm | SS1 | 2,067 | 3.817 | 0.840 | 137 |
| | SS2 | 1,263 | 3.277 | 0.551 | 90 |
| | SS3 | 1,405 | 3.237 | 0.625 | 102 |
| | 평균 | 1,578 | 3.444 | 0.672 | 110 |
| | FS1 | 17.58 | 3.943 | 0.726 | 118 |
| | FS2 | 37.52 | 4.017 | 0.753 | 123 |
| | Ave. | 27.55 | 3.980 | 0.739 | 121 |
| Ave. | | | 3.712 | 0.706 | 115 |

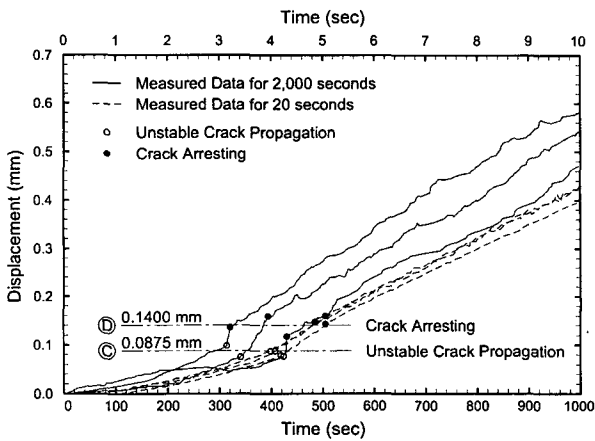


Fig. 4 Displacement histories with $a_o = 25.4$ mm

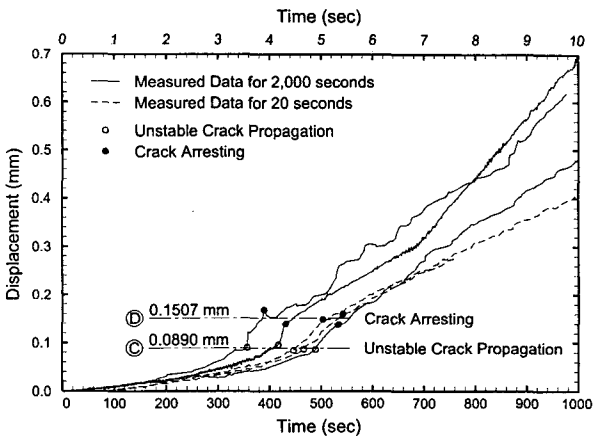


Fig. 5 Displacement histories with $a_o = 6.4$ mm

서 멈추며, 이는 불안정 균열성장 동안의 탄성에너지 소모와 미소균열단이 콘크리트의 압축영역에 접근하면서 균열의 성장이 억제되는 것으로 판단된다. 2000 sec 실험의 경우에 불안정 균열성장은 약 1~60 sec 동안 발생되었으며, 20 sec 실험의 경우는 약 1 sec 이내에 발생되었다. 20 sec 동안의 실험결과는 상대적으로 빠른 균열의 성장과 실험자료의 측정으로 2000 sec 동안의 실험보다 정확한 변위제어를 보여준다. 초기균열길이에 관계없이 불안정 균열성장은 최대하중 이후에 0.088~0.145 mm의 하중점-변위에서 발생되었다.

이 연구에서는 미소균열단의 위치를 측정하기 위해 변형률 게이지가 사용되었으며, Fig. 6은 초기균열길이가 25.4 mm인 시험편의 측면에서 측정된 변형률이다. 각 게이지의 변형률의 기울기가 급격히 변하는 하중점-변위에 대한 균열길이를 게이지의 위치로 가정하여 하중점-변위에 대한 균열길이가 측정되었다. 이 경우 변형률 게이지가 시험편의 측면에 부착되어 시험편의 두께 방향으로 일정하지 않은 균열길이의 고려에 어려움이 있으나, 시험편의 표면에만 균열이 있는 경우에 균열이 발생되지 않은 내부의 강성은 측면의 변형률의 감소에 영향을 줄 수 있기 때문에 평균적인 의미에서 Fig. 6으로부터 미소균열단의 위치가 결정되었다. Fig. 6의 게이지 ⑦은 시험편의 위연단에 부착된 것으로 게이지의 압축 변형률의 기울기가 완만해 지는 하중점-변위에서 미소균열단이 시험편을 완전히 관통하는 것으로 가정하였다.

Fig. 7은 이와 같은 방법으로 측정된 균열길이다. 하나의 실험자료가 사용될 경우에 균열의 성장에 대한 일정한 경향을 설정하기 힘들다, 여러 실험결과에 대한 평균 균열성장은 Fig. 7과 같이 미소균열단의 성장에 대한 일정한 경향을 보여준다. 초기균열길이가 25.4 mm인 시험편에 대해 63.5 mm의 균열성장 동안은 하중점-변위에 대해 근사적으로 비례하며, 이후 균열의 성장률은 급격히 감소

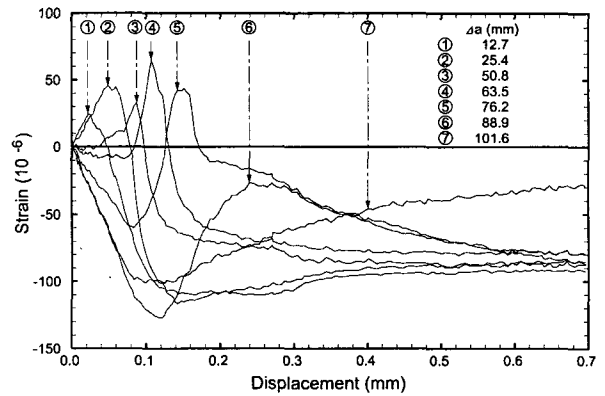


Fig. 6 Typical example of measured strains with $a_o = 25.4$ mm

하여 Fig. 4와 5에서 결정된 단계 ④에서 균열성장의 구속이 있는 것을 보여준다. 초기균열길이가 6.4 mm인 시험편의 경우에는 초기 25.4 mm의 균열성장 후에 성장률의 감소를 보이며, 이는 25.4 mm 초기균열길이보다 큰 휨강성과 초기균열단 주변에서 건조수축에 의한 손상으로 판단된다. Fig. 4와 5에서 결정된 단계 ③과 ④ 사이에서 발생한 불안정 균열성장의 크기는 25.4 mm 초기균열길이에 대해 27 mm 그리고 6.4 mm 초기균열길이에 대해 33 mm 이었다. 불안정 균열성장이 시작될 때의 균열길이는 초기 균열길이에 어느 정도 영향을 받으나 대략 73 mm이었다. 6.4 mm 초기균열길이의 경우 하중점-변위에 대해 상대적으로 작은 균열길이는 보다 큰 파괴진행대에 의한 것으로 판단된다.

4. 저항곡선

콘크리트의 파괴거동에서 소성변형이 아직 명확히 입증되지 않고, 하중이 제거되는 동안에 발생하는 영구변형이 거친 콘크리트 균열면에서 마찰과 균열면 주변의 압축 잔류응력의 결과로 간주될 수도 있다³⁾. 이 경우 하중이 제거되는 동안에는 균열면의 마찰과 이에 의한 균열단의 인장 잔류응력 그리고 균열면의 압축 잔류응력이 고려되는 독립된 역학기구가 적용되어야 한다. 이 연구의 실험결과는 Fig. 2와 3 같이 변위제어의 오차에 의한 일부 하중제거가 있으나 영구변형이 고려될 수 있을 정도가 아니기 때문에 영구변형에 의한 에너지 소모가 고려되지 않았다. 따라서 평균 파괴에너지 E_f^{ave} 는 하중점-변위 δ 에 대한 평균 외부일 W^{ave} 와 평균 하중 P^{ave} 에 대해 다음과 같이 계산되었다.

$$E_f^{ave} = W^{ave} - \frac{1}{2}P^{ave}\delta \quad (4)$$

이 방법으로 계산된 파괴에너지에는 하중이 제거될 때에 발생하는 영구변형에 의한 에너지의 소모가 고려되지 않았기 때문에 안전측으로 계산된 파괴에너지의 최소 값이다.

Fig. 8과 9는 각각 균열성장길이나 균열길이에 대한 가능한 평균 파괴에너지의 최소 값이다. Fig. 8의 균열성장길이는 초기균열길이가 25.4 mm와 6.4 mm인 시험편에 대해 파괴진행대의 크기 또는 균열성장길이가 같은 경우에 파괴에너지로 불안정 균열성장이 발생되기 전인 단계 ③까지 적은 차이를 보인다. 그러나 불안정 균열성장 이후에는 같은 균열성장길이에 대해 상대적으로 콘크리트의 압축영역이 큰 25.4 mm 초기균열길이의 시험편이 보다 많은 파괴에너지를 필요로 한다. 두 시험편에 대해 같은 미소균열단의 위치를 나타내는 균열길이에 대한 파괴에너지는 Fig. 9와 같이 파괴진행대의 크기가 19 mm 큰 6.4 mm

초기균열길이의 시험편이 보다 많은 파괴에너지를 필요로 한다.

Fig. 10과 11은 각각 균열성장길이 또는 파괴진행대와 균열길이의 크기에 대한 저항곡선을 나타내는 파괴에너지율 G_f^{ave} 이다. 여기서 파괴에너지율을 단위 면적의 미소 균열단의 성장과 이로 인한 파괴진행대의 증가에 필요한

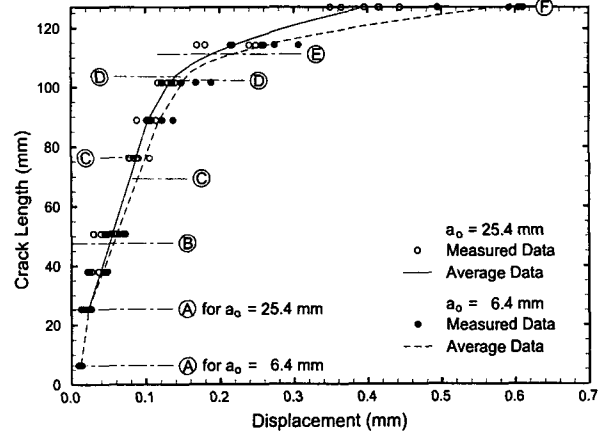


Fig. 7 Measured and average crack lengths

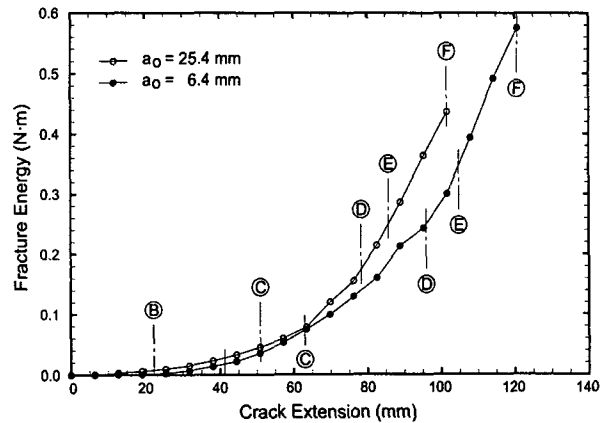


Fig. 8 Average fracture energies for crack extension

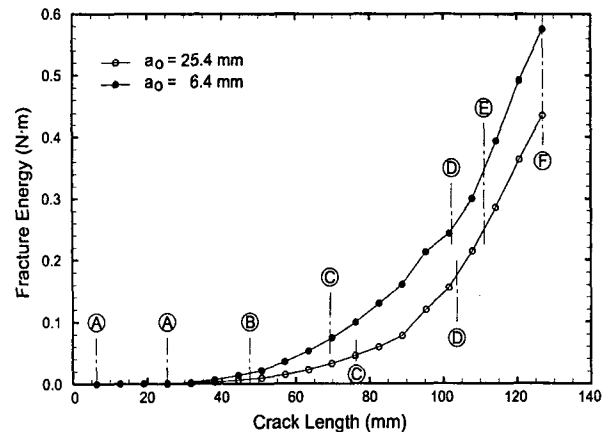


Fig. 9 Average fracture energies for crack length

에너지로 Fig. 8과 9의 평균 파괴에너지로부터 다음과 같이 계산되었다.

$$G_f^{ave} = \frac{\Delta E_f^{ave}}{\Delta a} \quad (5)$$

Fig. 10 또한 불안정 균열성장 이전에 파괴에너지율은 파괴진행대의 크기가 같은 경우에 25.4 mm와 6.4 mm의 초기균열길이에 관계없이 유사한 값을 보여준다. Fig. 10의 단계 ③에 해당하는 하중은 Fig. 2와 3의 외부하중의 기울기가 급격히 감소하는 단계 ③과 같으며, 단계 ③를 전후해서 균열성장길이에 대한 파괴에너지율의 기울기의 변화를 보여준다. Fig. 11은 파괴진행대 크기의 19 mm 차이에 대한 저항곡선이다.

단계 ③의 불안정 균열성장동안에는 파괴진행대의 크기 또는 균열성장길이보다는 균열길이 또는 미소균열단의 위치에 따라 유사한 파괴에너지율을 보여준다. 단계 ④에서 균열의 성장이 구속되거나 상대적으로 큰 파괴에너지율을 필요로 한다. 이는 미소균열의 성장이 억제되는 반면에 이미 형성된 파괴진행대에서 균열면-변위의 증가에 보다 많은 파괴에너지가 소모되며, 파괴진행대의 크기가 큰 6.4 mm 초기균열길이의 시험편이 보다 큰 저항곡선을 보여준다. 단계 ⑤에 이르게 되면 파괴에너지율의 기울기는 급격히 감소하며, 이는 초기균열단에서 임계값인 균열면-변위 또는 경계응력이 영(traction free)인 완전한 파괴진행대가 형성된 것으로 판단된다. 25.4 mm 초기균열길이의 시험편에 대해 파괴진행대의 크기는 약 86 mm 그리고 6.4 mm 초기균열길이의 시험편은 105 mm이며, 이는 높이가 상대적으로 작은 삼점휨 시험편에 대한 결과로 시험편의 기하학적 특성에 따라 파괴진행대의 크기가 결정되는 것을 보여준다. 완전한 파괴진행대가 형성되는 단계 ⑤ 이후에 파괴에너지율의 평균은 25.4 mm 초기균열길이의 경우 229 N/m(23.4 kgf/m) 그리고 6.4 mm 초기균열길이에 284 N/m(29.0 kgf/m)로 최대 파괴에너지율은 파괴진행대의 크기에 비례하였다. 저항곡선은 균열의 성장이 억제되는 단계 ④ 이전의 불안정 균열성장 동안에 파괴에너지율은 식 (3)에 의해서 계산된 평균 파괴에너지율 $G_f^{ave} = 115 \text{ N/m}$ (11.7 kgf/m)에 도달하였다. 그러나 최대 파괴에너지

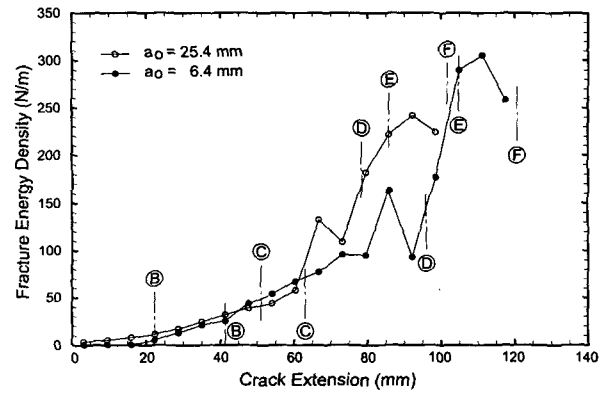


Fig. 10 Average resistance curves for crack extension

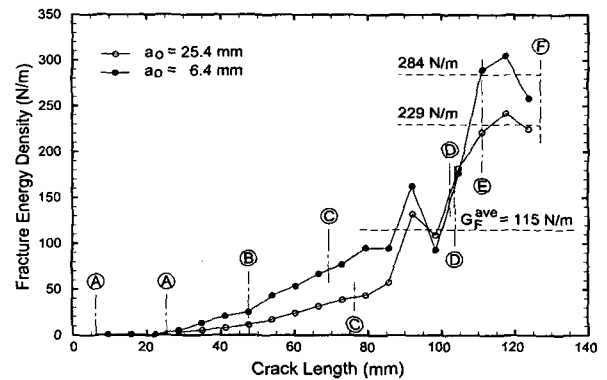


Fig. 11 Average resistance curves for crack length

지율은 평균 파괴에너지율에 비해 두 배 이상의 큰 값을 보이고 있다.

Table 2는 Fig. 4와 5 그리고 7과 11에서 결정된 파괴 거동에 대한 각 단계의 요약이다.

5. 결 론

콘크리트의 파괴특성을 나타내는 저항곡선을 계산하기 위해서 25.4 mm와 6.4 mm 초기균열길이의 삼점휨 시험편에 대해 약 2000 sec와 20 sec의 실험기간 동안에 실험이 실시되었다. 실험결과 이 실험의 하중점-변위의 속도에 대해 파괴거동에는 심각한 정도의 차이가 없었다. 각 시험

Table 2 Load-point displacements and crack lengths for each step (unit:mm)

| Step | $a_o = 25.4 \text{ mm}$ | | | $a_o = 6.4 \text{ mm}$ | | | Remarks |
|------|-------------------------|--------------|-----------------|------------------------|--------------|-----------------|---------------------------|
| | Disp. | Crack length | Crack extension | Disp. | Crack length | Crack extension | |
| A | 0.0232 | 25.4 | 0.0 | 0.0123 | 6.4 | 0.0 | Micro-crack extension |
| B | 0.0512 | 47.6 | 22.2 | 0.0566 | 47.6 | 41.3 | Decreasing slop of load |
| C | 0.0875 | 76.4 | 51.0 | 0.0890 | 69.3 | 63.0 | Unstable crack extension |
| D | 0.1400 | 103.7 | 78.3 | 0.1507 | 102.3 | 95.9 | Arresting crack extension |
| E | 0.1890 | 111.1 | 85.7 | 0.2162 | 111.1 | 104.8 | Development of full FPZ |
| F | 0.3972 | 127.0 | 101.6 | 0.5755 | 127.0 | 120.7 | Tie behavior |

참고문헌

편에 대해 측정된 자료로부터 외부일의 평균에 대한 평균 하중과 평균 균열길이 계산되었고, 연속적으로 성장하는 균열에 대한 저항곡선이 제시되었다. 서로 다른 초기균열 길이에 대한 반응을 비교하여 균열길이 또는 파괴진행대의 크기와 시험편의 기하학적 특성에 따른 파괴특성에 미치는 영향이 연구되었다. 다음은 연속적으로 성장하는 균열의 평균 파괴거동에 대한 이 연구의 결론이다.

1) 시험편의 완전 파손에 필요한 외부일에 대한 균열면적의 비로 계산되는 평균 파괴에너지율은 초기균열길이와 하중 점-변위의 재하속도에 관계없이 약 115 N/m(11.7 kgf/m)이었다.

2) 이 연구에 사용된 시험편의 크기에 대해 하중점-변위 0.088~0.154 mm에서 불안정 균열성장이 있었으며, 불안정 균열성장은 시험편의 기하학적 특성 및 하중의 경계 조건에 의한 것으로 판단된다. 삼점휨실험에서 불안정 균열성장 동안의 균열길이는 파괴진행대의 크기에 큰 영향을 받지 않았다.

3) 변형률 게이지를 사용하여 측정된 각 시험편의 균열길이의 평균 균열길이는 일정한 경향을 보였다. 균열길이는 불안정 균열성장이 진행중인 균열길이 88.9 mm까지 하중점-변위에 비례하며, 이후 미소균열단이 콘크리트의 압축 영역에 접근함에 따라 균열의 성장률은 급속히 감소하였다.

4) 평균 외부일과 균열길이의 관계로부터 최소 파괴에너지와 저항곡선이 계산되었다. 계산된 저항곡선은 불안정 균열성장 이전에는 파괴진행대의 크기에 따라 유사한 값을 보이나, 시험편의 기하학적 특성에 의해 불안정 균열성장과 균열성장의 구속되었고, 최대 파괴에너지율은 초기균열길이에 따라 25.4 mm에 대해 229 N/m와 6.4 mm에 대해 284 N/m이었다. 이 값은 평균 파괴에너지율 115 N/m의 두 배 이상의 값이었다. 평균 파괴에너지율 G_F^{ave} 은 불안정 균열성장 동안에 발생되며, 이때 균열길이는 두 초기균열길이 모두에 대해 약 88 mm이었다.

1. Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete," John Wiley & Sons, New York, 1995, p.552
2. Navalurkar, R. K., Hsu, C.-T. T., Kim, S. K., and Wecharatana, M., "True Fracture Energy of Concrete," *ACI Materials Journal* Vol. 96, No. 2, 1999, pp.213~225.
3. Yon, J. H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Comparisons of Concrete Fracture Models," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, No. 3, 1997, pp.196~203.
4. Yon, J. H., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Numerical Simulation of Mode I Dynamic Fracture of Concrete," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 117, No. 7, 1991, pp.1595~1610.
5. Comite Euro-International du Beton, *CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*, Tomas Telford, London, 1991, 437p.
6. Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P. E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, No. 6, 1983, pp.345~356.
7. Bazant, Z. P., and Oh, B. H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete," *Materials and Structures, RILEM*, Vol. 16, 1983, pp. 155~177.
8. Jenq, H. K., and Shah, S. P., "Two Parameter Fracture Model for Concrete," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 111, No. 4, 1985, pp.1227~1241.

요 약

콘크리트 시험편에 대한 삼점휨실험을 실시하여 여러 실험에 대해 측정된 반응의 평균값을 계산하고, 계산된 평균거동으로부터 삼점휨 시험편이 완전히 파손될 때까지 연속적으로 성장하는 균열에 대한 파괴거동이 분석되었다. 이 연구에서 사용된 실험 변수는 25.4 mm와 6.4 mm의 초기균열길이 그리고 2000 sec와 20 sec의 실험기간이며, 초기균열길이는 파괴진행대(FPZ) 크기의 영향과 시험편의 기하학적 특성 및 경계조건에 대한 영향을 분석하기 위한 것이다. 실험기간은 초기 크리프(creep)의 영향을 위해 설정되었으나, 이 연구의 하중점-변위 속도에서는 심각한 영향이 관측되지 않았다.

여러 실험의 평균 외부일로부터 평균하중이 계산되었으며, 변형률 게이지를 사용하여 평균 균열길이를 측정하였다. 최대하중 이전의 저항곡선은 파괴진행대의 크기에 대해 유사한 값을 보였다. 그러나 최대하중 직후에는 초기균열의 크기에 관계없이 0.088~0.154 mm의 하중점-변위에서 88 mm의 불안정 균열성장이 발생되었으며, 평균 파괴에너지율 $G_F^{ave} = 115 \text{ N/m}$ 은 이 불안정 균열성장 동안에 발생되었다. 균열길이 111 mm에서 완전한 파괴진행대가 형성되었고, 25.4 mm와 6.4 mm의 초기균열 길이에 대해 파괴진행대의 크기는 각각 86 mm와 105 mm이었다. 완전한 파괴진행대의 형성 이후 저항곡선의 평균 파괴에너지율은 25.4 mm와 6.4 mm의 초기균열길이에 대해 각각 229 N/m와 284 N/m로 G_F^{ave} 의 두 배 이상이었다.

핵심용어 : 콘크리트, 파괴역학, 삼점휨실험, 균열성장, 저항곡선