

動的荷重을 받는 콘크리트의 破壞特性和 파괴에너지의 크기효과에 관한 研究

Dynamic Fracture Characteristics and Size-dependence of Fracture Energy of Concrete under Dynamic Loading

오 병 환* · 정 철 현**
Oh, Byung Hwan Chung, Chul Hun

Abstract

The fracture characteristics of concrete under various rates of loading are investigated. The static and dynamic fracture energies of concrete are determined and the size-dependency of fracture energy is clarified from the present study. To this end, a series of experiments were conducted. The maximum failure loads, fracture energies and nominal failure stresses were calculated from those test results. It is found that the fracture energies are increased with the increase of loading rate. The fracture energy values were also greatly influenced with the size of the specimen. The size-dependent prediction equations for the static and dynamic fracture energies of concrete are proposed in the present study. The present paper provides useful data for the dynamic fracture analysis of concrete structures.

要 旨

本 論文에서는 動的荷重을 받는 콘크리트의 파괴특성을 규명하고, 動的荷重下에서의 변화특성을 연구하였다. 이를 위하여 포괄적인 실험연구가 수행되었으며 부재크기의 영향을 분석하기 위하여 몇가지 시리즈로 분류하여 실험하였다. 본 실험으로부터 最大破壞荷重, 靜的 및 動的 破壞에너지 그리고 공칭파괴응력이 계산되었다. 本 研究結果 變形速度가 증가함에 따라 콘크리트의 파괴에너지가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 부재의 크기가 커짐에 따라 파괴에너지 값이 상당히 변화되는 것으로 나타났다. 本 研究에서는 부재 크기에 따른 콘크리트의 靜的 및 動的 파괴에너지를 예측할 수 있는 예측공식을 도출하여 제시하였다. 本 研究는 콘크리트의 동적파괴거동해석에 유용한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

*正會員 · 서울大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

**正會員 · 서울大學校 大學院 博士課程, 土木工學科

1. 序 論

콘크리트構造物은 토목구조물 중에서도 가장 광범위하게 사용되고 있으며, 특히 일반 토목구조물 뿐만 아니라 고도의 기술을 요하는 원자력발전소, 해양구조물 등의 특수 구조물에 이르기까지 포괄적으로 중요하게 사용되고 있다. 특히, 이러한 중요한 構造物에서의 균열문제는 상당한 문제를 유발할 수 있기 때문에 이에 대한 집중적인 연구가 필요하게 된다.

콘크리트의 파괴거동에 대한 연구는 비교적 최근에 들어서 활발해지기 시작한 학문분야로서 1961년 Kaplan이 처음으로 콘크리트 파괴실험을 수행함으로써 시작되었다. 파괴역학과 파괴이론은 원래 금속과 강재에서부터 발달되기 시작하였으며, 최근에 와서야 콘크리트에 대한 파괴이론이 연구되기 시작하고 있다. 이와 같이 콘크리트의 파괴이론 정립이 늦어진 이유로는 콘크리트의 파괴거동이 근본적으로 금속의 파괴거동과 다르기 때문이다. 콘크리트는 비균질성(heterogeneous) 및 비선형성(nonlinear behavior)을 띄는 재료로서 균열끝에서 상당한 양의 미세균열(microcracks)을 수반하게 된다. 이러한 미세균열로 인하여 콘크리트 내의 응력은 감소하게 된다. 그러나, 강재의 경우 균열끝에서는 소성항복(plastic yielding)이 일어나게 되며 이 비선형 영역도 콘크리트의 경우보다는 작게 된다. 콘크리트의 균열끝에서는 미세균열로 인하여 커다란 파괴진행대(fracture process zone)가 존재함을 알 수 있으며 이것이 강재의 파괴현상과 근본적으로 다른 점이다⁽¹⁻³⁾. 이와 같이 콘크리트의 파괴거동은 아주 복잡하며 따라서 그 접근이 쉽지 않다. 지금까지 대부분의 연구는 콘크리트에 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics)의 적용 가능성에 대한 연구가 많이 이루어졌으며, 그 결과 보통 콘크리트구조물에는 비선형파괴이론을 도입해야 한다는 연구결과가 제안되고 있다. 그것은 콘크리트가 본질적으로 선형탄성 材料가 아니기 때문이며 따라서 비선형파괴이론의 개발은 필수적이라고 볼 수 있다. 콘크리트구조의 비선형 파괴해석을 수행하기 위해서는 콘크리트의 파괴에너지를 알아야 하며 따라서 이를 결정하는 일이 중요하다. 본 필자는 정적인 하중을 받는 콘크리트의

에너지를 결정하기 위한 연구를 수행한 바 있으며,⁽²⁴⁾ Petersson,⁽¹⁸⁾ Bazant,⁽¹⁻³⁾ Shah⁽⁹⁻¹¹⁾ 등도 콘크리트의 정적 파괴에너지를 결정하기 위한 연구를 수행하였다.

그러나, 아직까지 동적인 하중을 받는 콘크리트의 파괴에너지 결정에 관한 연구가 별로 수행되지 않은 실정이며, 동적파괴특성이 규명되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 동적인 하중을 받는 콘크리트의 파괴특성을 연구하고자 한다.

동적인 하중을 받을 때의 콘크리트의 파괴거동과 그 특성은 정적하중 하에서의 거동과는 상당히 다를 것으로 예견되고 있으며, 그것은 콘크리트가 비균질성의 재료이기 때문에 더욱 영향이 클 것으로 사료되고 있다. 이것은 본 필자의 콘크리트의 압축 및 인장에 대한 동적 거동 연구에서도 밝혀진 바 있다⁽²⁶⁾.

이러한 동적파괴거동의 규명은 콘크리트構造物이 동적하중이나 충격하중 또는 충동하중(impulsive load)을 받을 때 파괴거동을 해석하고 예측하는데 중요한 기초를 제공하게 된다.

따라서, 본 연구의 목적은 콘크리트가 동적하중을 받을 때의 파괴거동과 파괴특성을 규명하고, 동적하중 하에서의 콘크리트의 파괴에너지를 결정하며, 콘크리트 부재의 크기에 따른 파괴에너지의 변화 특성을 규명하여, 동적파괴해석에 중요한 기초를 제시하는데 있다.

2. 콘크리트의 動的破壞特性 實驗

2.1 實驗 概要

콘크리트의 動的破壞舉動을 규명하기 위하여 일련의 파괴역학실험을 수행하였다. 파괴거동에 관한 실험은 정적 수준에서부터 빠른 동적 수준에 이르기까지 변형속도를 변화시키며 실험을 수행하였다. 본 실험으로부터 정적파괴에너지 및 동적파괴에너지가 측정 및 계산되었고 공칭파괴응력도 계산되었다. 또한 시편의 크기에 따른 파괴에너지의 변화양상도 규명하였으며 이에 대한 특성을 분석하였다. 본 장에서는 이에 대한 연구 내용을 구분하여 상술하기로 한다.

2.2 실험시편의 制作

콘크리트의 동적 파괴특성과 파괴에너지의 크기 효과를 규명하기 위하여 세가지 크기의 콘크리트

표 1. 콘크리트의 배합 성분과 강도

Water(kg/m ³)	Cement(kg/m ³)	Fine Agg.(kg/m ³)	Coarse Agg. (kg/m ³)	W/C Ratio((%)	Compressive Strength(MPa)
157.1	313.6	754.4	1106.3	50	29.8

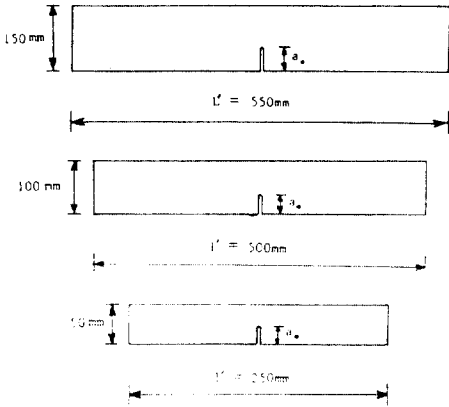


그림 1. 본 실험에 사용된 콘크리트 보의 형상과 크기

보를 제작하여 실험을 수행하였다. 첫번째 시리즈는 100×100×500mm의 보통크기의 보이며 이 보다 작은 50×50×250mm의 시리즈와 150×150×550mm의 큰시편 시리즈의 세 종류로 구분하여 제작하였다. 이 세가지 시리즈의 콘크리트 보는 초기균열길이 a_0 를 보의 깊이 H의 각각 $a_0/H=0, 0.25, 0.5, 0.75$ 로 변화 시켜가며 제작하였다(그림 1). 이것은 초기균열길이에 따른 콘크리트 파괴에너지의 변화양상을 규명하기 위함이었다. 이러한 콘크리트 보는 각 시리즈 별로 100개씩 제작하였으며, 압축강도 측정용 실린더시편도 20개씩 제작하였다.

본 실험연구에 사용된 콘크리트의 배합성분과 강도가 표 1에 요약되어 있다.

2.3 實驗方法 및 수행

上記에서 제작된 각 시리즈의 콘크리트 보에 대하여 파괴특성을 규명하기 위한 실험이 수행되었다. 콘크리트 보는 3점휨하중상태(three-point bending condition)로 재하되었으며, 실험은 Instron 자동제어재료시험기를 이용하여 수행하였다. 실험은 각 초기균열길이 별로 4단계의 변형속도로 구분되어 실험이 수행되었으며, 즉 정적수준인 8.333×10^{-4} mm/sec에서부터 동적 하중수준인 8.333×10^{-1}

mm/sec까지 구분되어 실험이 수행되었다. 이러한 실험은 각 시리즈에 대하여 모두 수행되었다. 실험 수행 중에 하중과 변위에 대한 관계곡선이 자동적으로 기록되었으며, 이 결과가 파괴에너지 계산에 이용되었다. 본 실험의 개략도가 그림 2에 도시되어 있다.

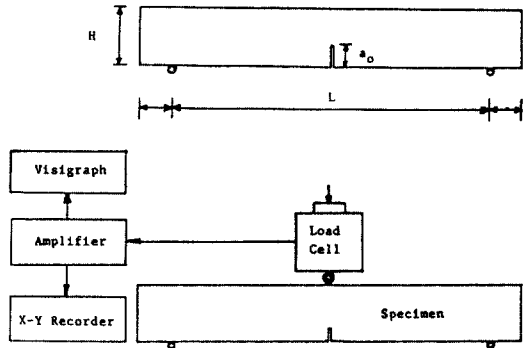


그림 2. 본 실험연구의 실험장치 개략도

3. 실험결과 및 분석

본 장에서는 上記 2장의 실험으로부터 얻어진 결과에 대하여 구분하여 기술하고자 한다.

3.1 최대破壞荷重

본 연구의 실험으로부터 우선적으로 측정된 결과가 각 부재의 파괴하중(maximum failure load)이다. 이 파괴하중이 초기균열길이 별로 측정되어 그림 3에 도시되어 있다. 이 그림 3에서 보듯이 초기균열길이가 증가함에 따라 파괴하중이 상당히 감소함을 알 수 있다. 또한 같은 초기 균열길이에 서 변형속도가 빨라질수록 파괴하중이 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 그림 4에 더욱 선명하게 요약되어 있다. 즉 그림 4는 각각의 시리즈에 대하여 초기균열길이 별로 변형속도에 따라 최대하중이 증가하는 것을 일목요연하게 보여주고 있다.

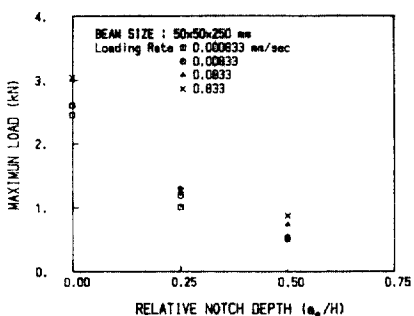
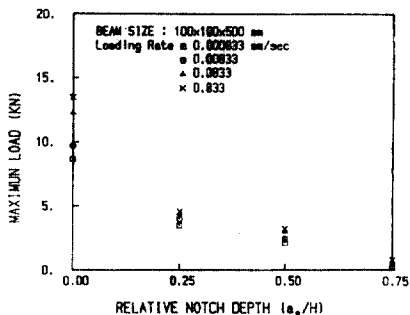
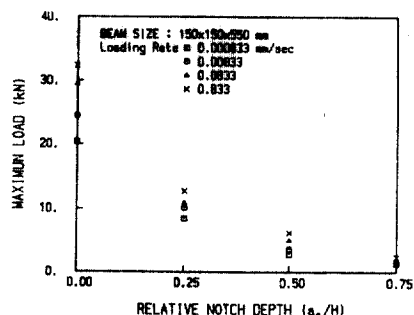


그림 3. 초기균열길이에 따른 최대파괴하중의 변화양상

3.2 콘크리트의 파괴에너지 계산

콘크리트의 파괴에너지(fracture energy)는 콘크리트의 단위면적의 균열을 일으키는데 소요되는 에너지이며, 이것은 본 연구의 실험결과로부터 계산할 수 있다. 즉 본 실험에서 얻어진 하중과 처짐곡선 아래의 면적으로부터 콘크리트의 파괴에너지를 계산할 수 있다(그림 5 참조).

따라서 콘크리트의 파괴에너지는 다음 식과 같이 표시된다.

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{B(H - a_0)} \quad (1)$$

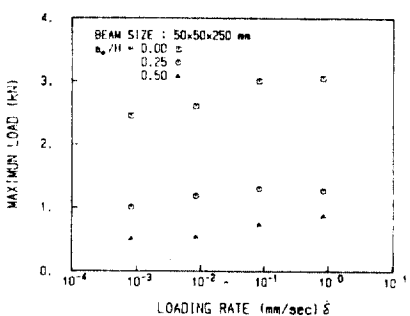
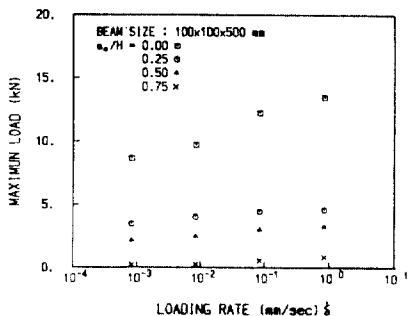
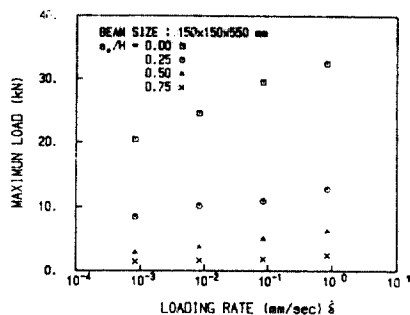


그림 4. 하중의 재하속도에 따른 최대파괴 하중의 변화양상

여기서, $W = \int_0^{\delta_0} P(\delta) d\delta$ = 하중-처짐곡선 아래의 면적, mg = 보의 자중, δ_0 = 하중-처짐곡선에서 하중이 영으로 떨어지는 점의 처짐, B = 보의 폭, H = 보의 깊이, a_0 = 초기균열길이를 나타낸다.

上記 式에서 분자의 첫째 항은 하중에 의해 수행된 에너지이고, 두번째 항은 자중에 의해 행하여진 에너지를 표시한다. 上記式으로부터 계산된 파괴에너지를 초기균열길이에 따라 그린 것이 그림 6이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 콘크리트의 파괴에너지는 초기균열길이가 증가함에 따라 감소하

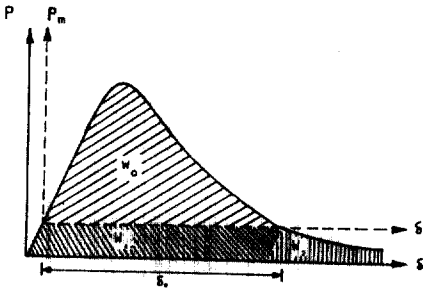


그림 5. 3점휨하중에 의한 하중-처짐곡선

며, 어느 정도 이상의 초기균열에서는 파괴에너지가 일정해지는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7은 하중속도에 따라 콘크리트의 파괴에너지가 증가하고 있음을 보여주고 있는데, 특히 초기균열비가 0.25 이상에서는 초기균열의 크기에 관계없이 거의 같은 값들의 파괴에너지를 보여주고 있음을 알 수 있다. 초기균열이 없는 경우에 파괴에너지가 큰 것은 균열끝의 파괴진행영역 바깥에서 추가적인 에너지 소모가 크게 일어나기 때문인 것으로 분석되고 있다. 따라서 콘크리트의 실제적인 파괴에너지는 초기균열길이에 따라 변함이 없는 구간 즉 $a_0/H=0.25$

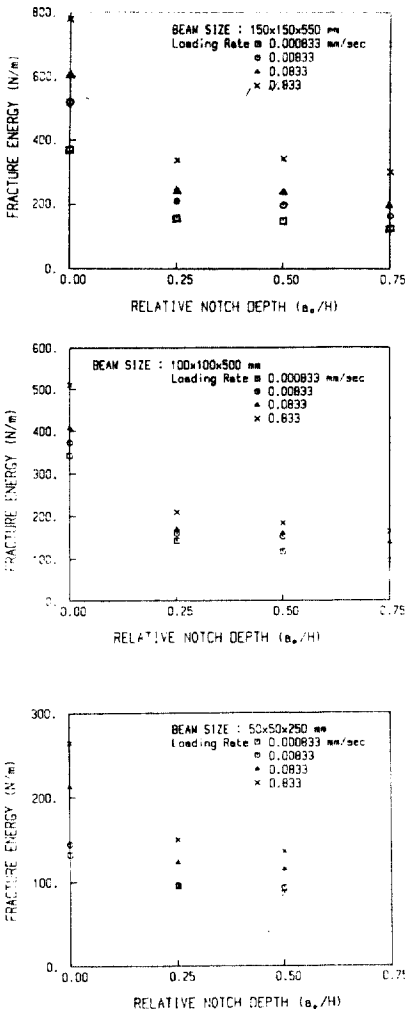


그림 6. 초기균열길이에 따른 콘크리트의 파괴 에너지

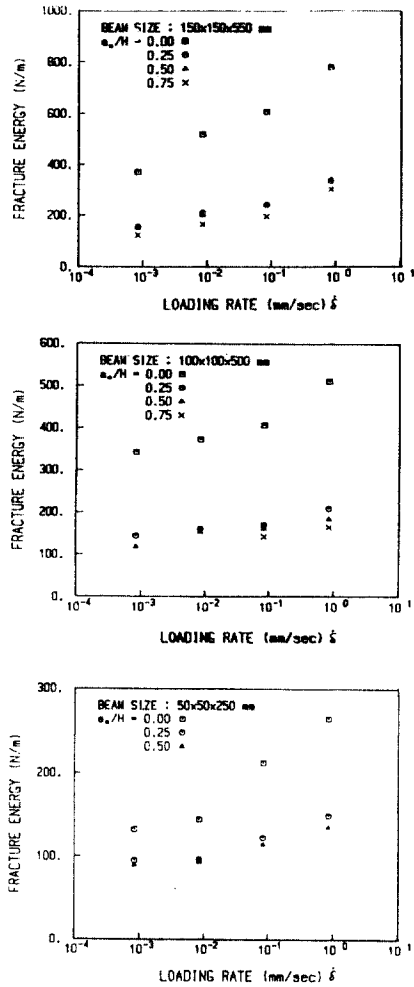


그림 7. 하중속도에 따른 콘크리트의 파괴에너지

와 0.50사이에서 결정될 수 있고, 이 값들을 요약한 것이 표 2이다. 이러한 결과는 최근에 실험역학학회(Society for Experimental Mechanics, SEM)에서 콘크리트 보의 초기균열깊이비를 0.3으로 제한한 사항을 잘 뒷받침해주고 있다⁽²⁵⁾.

표 2 각 하중속도에 따른 콘크리트의 실제적인 파괴에너지(N/m)

Beam Size (mm)	Load-Point Displacement Rate(mm/sec)			
	8.333×10^{-4}	8.333×10^{-3}	8.333×10^{-2}	8.333×10^{-1}
50×50×250	91.9	94.5	116.0	136.9
100×100×500	131.0	156.9	165.9	196.7
150×150×550	151.7	202.7	241.3	338.9

3.3 콘크리트의 동적파괴에너지

前節에서 본 바와 같이 변위속도가 증가함에 따라 실제적인 파괴에너지가 증가하고 있다. 前節의 표 2에 요약된 실제적인 파괴에너지를 靜的 수준의 값 G_{f0} 의 상대적인 비로 표시하여 그린 것이 그림 8이다. 이 그림 8로부터 회귀분석하여 동적파괴에너지의 예측공식을 도출하면 다음과 같다.

$$\frac{G_{fd}}{G_{f0}} = 1.46 + 0.167 \log \dot{\delta} \text{ for } H=50\text{mm} \quad (2)$$

$$\frac{G_{fd}}{G_{f0}} = 1.56 + 0.183 \log \dot{\delta} \text{ for } H=100\text{mm} \quad (3)$$

$$\frac{G_{fd}}{G_{f0}} = 2.16 + 0.394 \log \dot{\delta} \text{ for } H=150\text{mm} \quad (4)$$

여기서, G_{fd} =動的破壞에너지, G_{f0} =靜的破壞에너지, $\dot{\delta}$ =荷重의 變位速度(load-point displacement rate, mm/sec)를 나타낸다. 변위속도로 표시된 하중속도는 試片의 形狀에 영향을 받으므로 좀 더 일반화된 變形速度(strain rate)로 변환시키는 것이 바람직하다. 보의 휨이론을 적용하여 변위속도를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\delta} = \frac{P(t) L^3}{48EI(t)} \quad (5)$$

따라서,

$$\dot{\delta} = \frac{d}{dt} \delta = \frac{L^3}{48} \frac{d}{dt} \left(\frac{P(t)}{EI(t)} \right) \quad (6)$$

균열선단에서의 변형도 $\epsilon(t)$ 는

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} = \frac{M(t)(H-a_0)}{EI(t) 2}$$

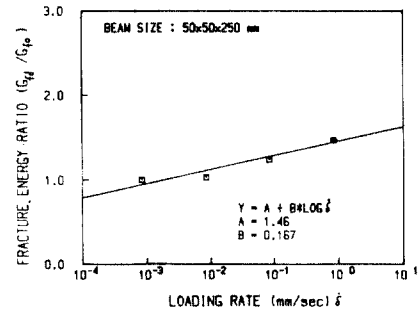
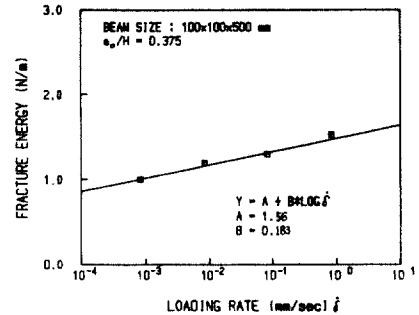
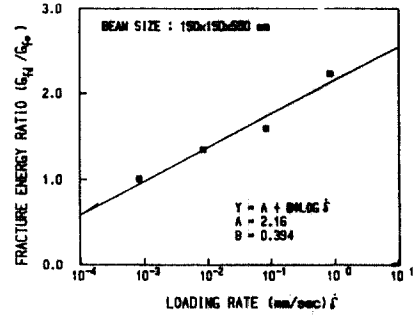


그림 8 변위속도에 따른 동적 파괴에너지의 증가현상

$$= \frac{L}{8} \frac{P(t)(H-a_0)}{EI(t)} \quad (7)$$

따라서,

$$\dot{\epsilon} = \frac{L(H-a_0)}{8} \frac{d}{dt} \left(\frac{P(t)}{EI(t)} \right) \quad (8)$$

式(6)을 式(8)에 대입하여 정리하면

$$\dot{\epsilon} = \frac{6(H-a_0)}{L^2} \dot{\delta} \quad (9)$$

여기서, EI =보의 휨강성, L =보의 지간을 의미한다. 이와 같이 계산된 변형속도에 따라 실제적인 파괴에너지를 그림으로 도시한 것이 그림 9이다.

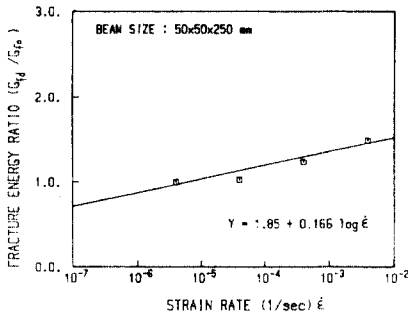
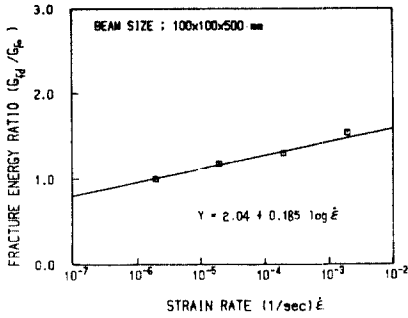
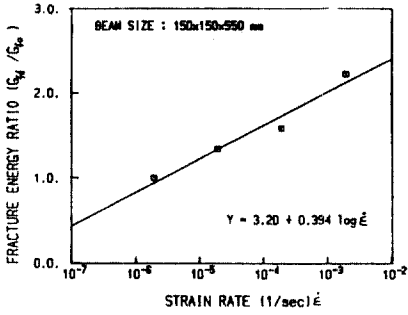


그림 9. 변형속도에 따른 동적파괴에너지의 증가현상

이 그림으로부터 회귀분석된 콘크리트의 동적 파괴에너지를 변형속도의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$G_{fd}/G_{fo} = 1.85 + 0.166 \log \dot{\epsilon} \text{ for } H=50mm \quad (10)$$

$$G_{fd}/G_{fo} = 2.04 + 0.185 \log \dot{\epsilon} \text{ for } H=100mm \quad (11)$$

$$G_{fd}/G_{fo} = 3.20 + 0.394 \log \dot{\epsilon} \text{ for } H=150mm \quad (12)$$

여기서, $\dot{\epsilon}$ = 변형속도로서 1/sec이다.

3.4 공칭파괴응력

본 연구에서 수행한 콘크리트의 파괴 역학실험으로부터 콘크리트 보의 공칭파괴응력을 계산할 수가 있다. 보의 휨이론에 따라 균열선단에서의 공칭파괴응력(nominal failure stress)은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_n = \frac{3P_{max}L}{2B(H-a_o)^2} \quad (13)$$

여기서, P_{max} = 최대파괴하중을 나타낸다.

본 실험결과로부터 각 시리즈 콘크리트의 공칭 파괴응력을 계산하여 도시한 것이 그림 10이다. 또한, 이러한 공칭파괴응력값을 정적수준의 값에 대해 상대적으로 표시한 것이 그림 11이다. 이 그림

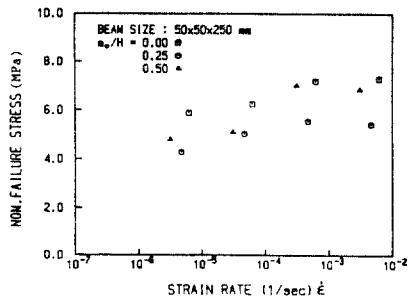
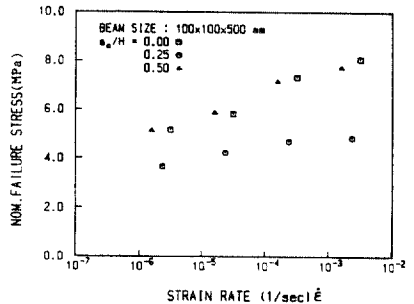
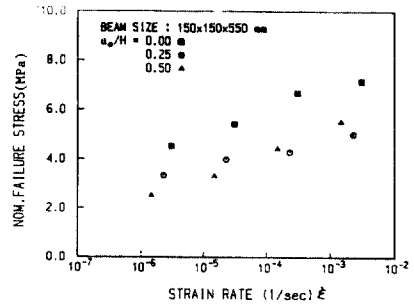


그림 10. 변형속도에 따른 각 시리즈 콘크리트의 공칭파괴응력

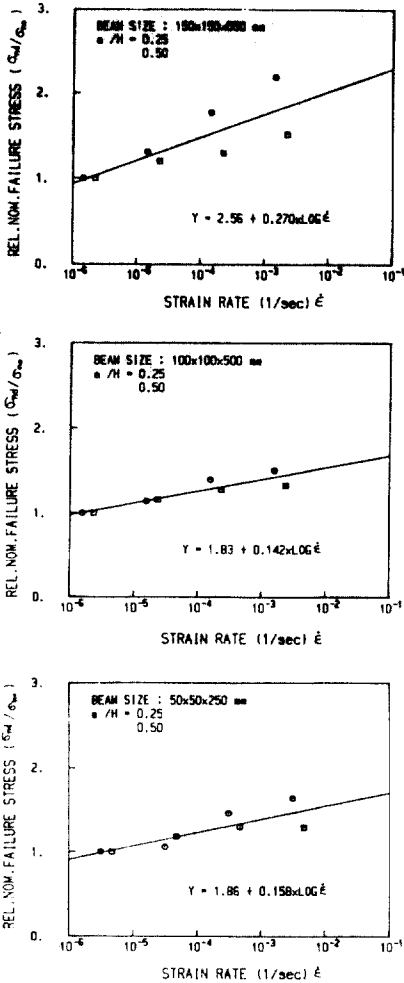


그림 11. 변형속도에 따른 동적파괴응력의 상대적인 증가 현상

들에서 보는 바와 같이 변형속도가 증가함에 따라 콘크리트의 파괴에너지가 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 동적하중 하에서의 콘크리트의 공칭파괴응력에 대한 예측공식이 회귀분석을 통하여 얻어졌다. 즉

$$\frac{\sigma_{nd}}{\sigma_{no}} = 1.86 + 0.158 \log \dot{\epsilon} \text{ for } H=50mm \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_{nd}}{\sigma_{no}} = 1.83 + 0.142 \log \dot{\epsilon} \text{ for } H=100mm \quad (15)$$

$$\frac{\sigma_{nd}}{\sigma_{no}} = 2.56 + 0.270 \log \dot{\epsilon} \text{ for } H=150mm \quad (16)$$

여기서, σ_{nd} =動的공칭파괴응력, σ_{no} =靜的공칭파괴응력이다.

4. 파괴에너지의 크기 효과

4.1 靜的 파괴에너지

콘크리트의 파괴에너지에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 골재의 크기, 콘크리트의 강도 등으로 알려져 있다^(1, 18). 본 연구자⁽²⁶⁾ 및 타연구자들은 이전 연구에서 콘크리트 시편크기의 영향은 무시하였으나, 본 연구의 실험결과에서 나타난 바와 같이 시편크기에 따라서 콘크리트의 파괴에너지가 변하는 것을 알 수 있다. 즉, 표 2에 요약되어 있듯이 부재깊이가 커질수록 파괴에너지는 증가하고 있으며, 본 연구에서는 이들을 함께 고려하여 콘크리트의 파괴에너지를 예측할 수 있는 공식을 도출하였다. 이 공식도출에는 본 연구의 자료뿐만 아니라 他研究의 결과^(8, 22, 23)들도 함께 이용하였다.

$$G_{10} = 59 \left(\frac{d_a}{B} \right)^{1.28} \left(\frac{H}{L} \right)^{0.75} \frac{B f_1^{1.2}}{E_c} \quad (17)$$

여기서, d_a =굵은 골재의 최대치수, B =보의 폭, H =보의 깊이, L =지간, f_1 =콘크리트 인장강도, E_c =콘크리트 탄성계수이다.

그림 12는 본 예측공식에 따라 계산된 파괴에너지와 여러가지 실험에서 측정된 파괴에너지를 상호비교하고 있으며, 상호 좋은 관성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

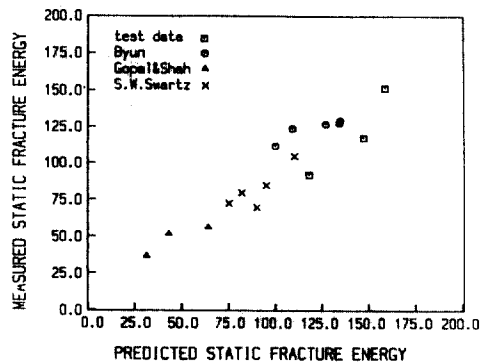


그림 12. 예측공식에 따라 계산된 파괴에너지와 실험파괴에너지의 상관성 비교

4.2 動的 파괴에너지의 크기효과

앞의 그림 9에서 본 바와 같이 변형속도가 증가함에 따라 콘크리트의 파괴에너지가 증가함을 알 수 있다. 그런데, 이 파괴에너지의 증가율이 보의 깊이가 큰 시리즈일수록 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 변형속도에 따른 회귀분석식의 기울기가 부재깊이가 큰 시리즈일수록 커지는 것으로부터 알 수 있으며, 이 결과는 타연구자의 연구 결과^(8, 11, 23) 와도 일치하는 경향을 보이고 있다. 따라서 콘크리트의 동적파괴에너지를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 변형속도뿐만 아니라 부재의 크기영향도 반드시 고려해야 한다는 것을 말해주고 있다. 지금까지의 실험결과에 의하면 하중속도에 영향을 미치는 주요인자는 變形速度, 부재깊이, 골재치수 등으로 나타나 있으며, 따라서 본 研究에서는 이들을 함께 고려하여 콘크리트의 동적파괴

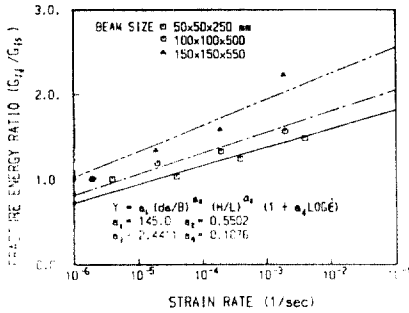


그림 13. 부재크기에 따른 상대동적파괴에너지의 이론치 및 실험치 비교

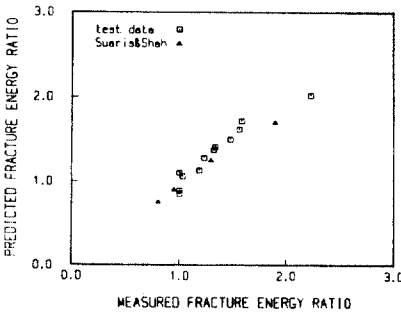


그림 14. 계산된 동적파괴에너지와 실측된 동적파괴에너지의 상관성 비교

에너지를 예측할 수 있는 예측공식을 도출하였다.

$$\frac{G_{fd}}{G_{to}} = 145 \left(\frac{d_a}{B} \right)^{0.55} \left(\frac{H}{L} \right)^{2.44} (1 + 0.108 \log \dot{\epsilon}) \quad (18)$$

상기 식에 따라 계산된 상대 동적파괴에너지가 본 실험결과와 함께 그림 13에 요약되어 있다. 상기 식(18)이 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 14는 계산된 파괴에너지와 실측된 여러파괴실험자료와 상호비교하고 있으며 비교적 좋은 상관성을 보이고 있다.

5. 結 論

本 研究에서는 動的荷重을 받는 콘크리트의 破壞力學의 特性을 규명하고, 動的荷重下에서의 콘크리트의 파괴에너지를 決定하며 콘크리트部材의 크기에 따른 파괴에너지의 변화특성을 규명하고자 하였다.

이를 위하여 本 研究에서는 포괄적인 실험연구를 수행하였다. 실험부재는 크기의 영향을 분석하기 위하여 세가지 크기의 시리즈로 분류하여 제작하였고, 변형속도의 영향을 고려하기 위하여 정적 수준의 변형수준에서부터 빠른 동적수준까지 변화 시키며 실험이 수행되었다. 본 연구로부터 최대 파괴하중, 정적 및 동적파괴에너지와 공칭파괴응력이 측정 및 계산되었다.

본 연구결과 變形速度가 증가함에 따라 콘크리트의 파괴에너지가 증가하는 것으로 나타났으며, 이 증가현상에 대한 예측공식이 도출되었다. 또한, 콘크리트의 파괴에너지는 부재의 크기에 따라서도 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 변형속도가 증가함에 따라 부재크기의 영향이 더욱 커지는 것으로 나타났다. 本 研究에서는 콘크리트의 정적 및 동적파괴에너지의 예측공식을 도출하여 제시하였다. 본 연구는 콘크리트의 동적파괴거동해석에 유용한 기초를 제공할 것으로 사료된다.

謝 辭

이 論文은 1988년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

參考文獻

1. Bazant, A. P., and OH, B. H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", *Material and Structures (RILEM, Paris)*, Vol. 16, 1983, pp.155-177.
2. Bazant, Z. P., and OH, B. H., "Rock Fracture via Strain-Softening Finite Elements", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 110, No. 7, 1984, pp. 1015-1035
3. Bazant, Z. P., and OH, B. H., "Microplane Model for Fracture Analysis of Concrete Structures", *Proc. Symp. on the Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures*, U. S. Air Force Academy, Colorado Springs, 1983, pp.49-55.
4. Barr, B. I. G., Hasso, E. B. D., and Sabir, B. B., "The Effect of Test Specimen on the Fracture Toughness of Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp.833-841.
5. Carpinteri, A., and Ingraffea, A. R., "Fracture Mechanics of Concrete", By Martinus Nijhoff Publishers, 1984.
6. Cho, K. Z., Kobayashi, A. S., and Hawkins, N. M., "Fracture Process Zone of Concrete Cracks", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, No. 8, Aug. 1984, pp.1174-1184.
7. Giorv, O. E., Sorenson, S. L., and Arnesen, A., "Notch Sensitivity and Fracture Toughness of Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, 1977, pp.333-344.
8. Hilsdorf, H. K., and Brameshuber, W., "Size Effects in the Experimental Determination of Fracture Mechanics Parameters", *Proc Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites*, ed. by S. P. Shah, 1985, pp.361-398.
9. Jeng, Y. S. and Shah, S. P., "Nonlinear Fracture Parameters for Cement based Composites: Theory and Experiments", *Proc. Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites*, ed. by S. P. Shah, 1985, pp.361-398.
10. Jeng, Y. S. M., and Shah, S. P., "A Two Parameter Fracture Model for Concrete", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 111, No. 10, Oct. 1985, pp.1227
11. John, R., and Shah, S. P., "Effect of High Strength and Rate of Loading on Fracture Parameters of Concrete", *SEM/RILEM Int. Conference on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, 1987, ed. by Shah and Swartz, pp.91-101.
12. Knott, J. F., "Fundamentals of Fracture Mechanics", by Publ. Butterworths, 1979.
13. Kalthoff, J. F., and Shockey, D. A., "Instability of Cacks under Impulse Loads", *Journal of Appl. Phys*, Vol. 48, No. 3, March 1977, pp.986-993.
14. Mindess, S., and Bentur, A., "A Preliminary of the Fracture of Concrete Beams Under Impact Loading, Using High Speed Photography", *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp.474-4.
15. Mindess, S., "Rate of Loading Effects on the Fracture of Cementitious Materials", *Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites*, NATO-ARW-, Sep. 4-7, 1984, pp.617-633.
16. Mindess, S., and Lawrence, F. V., "The J-Integral as a Fracture Criterion for Fiber Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, 1977, pp.731-742.
17. Nallathambi, P., and Karihaloo, B. L. "Prediction of Load-Deflection Behavior of Plain Concrete from Fracture Energy", *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp.474-484.
18. Petersson, P. E., "Fracture Energy of Concrete: Method of Determination", *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, 1980, pp.78-89, and "Fracture Energy of Concrete: Practical Performance and Experimental Results", *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, 1980, pp.91-101.
19. Petersson, P. E., "Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials", Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, 1981.
20. Reinhardt, H. W., "Tensile Fracture of Concrete at High Rates of Loading", *Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites*, NATO-ARW, Sept. 4-7, 1984, pp.559-590.
21. Sierakowski, R. L., "Dynamic Effect in Concrete Material", *Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites*, NATO-ARW, ed. by S. P. Shah, Sept. 4-7, 1984, pp.559-590.
22. Suaris, W., and Shah, S. P., "Properties of Concrete Subjected to Impact", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 7, July 1983, pp.1727-174 .
23. Swartz, S. E. and Refai, T. M., "Influence of Size Effects on Opening Mode Fracture Parameters for Precracked Concrete Beams in Bending", *SEM/RILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, 1987, ed. by Shak and Swartz, pp. 403-417.
24. 오병환, "응력-변형도관계를 이용한 콘크리트구조의 비선형 파괴해석", *대한토목학회논문집*, 제 4 권 제 4 호,
25. SEM Subdivision Committee on Fracture of Concrete and Rock, "Mode-I Round Robin Testing of Concrete Beams for Fracture Toughness Evaluation", June, 1988.
27. 오병환, 신수봉, "동적하중을 받는 콘크리트의 力學的 舉動에 관한 理論 및 實驗研究", *대한토목학회논문집*, 제 9 권 제 2 호, 1989년 6월, pp.31-42.

(接受: 1989. 12. 27)