

Rigid-Body-Spring Network를 이용한 RC 보의 속도 의존적 파괴 시뮬레이션

Rigid-Body-Spring Network with Visco-plastic Damage Model for Simulating Rate Dependent Fracture of RC Beams

임 윤 목* · 김 근 휘** · 옥 수 열***
Lim, Yun Mook · Kim, Kunhwi · Ok, Suyeol

요 약

하중 속도에 따른 콘크리트 재료의 역학적 특성은 구조물의 동적파괴거동에 영향을 미친다. 본 연구는, rigid-body-spring network를 이용하여 파괴해석을 수행하고, 거시적 시뮬레이션에서 속도효과를 표현하기 위하여 점소성 파괴모델을 적용하였다. 보정을 위해서 Perzyna 구성관계식의 점소성 계수들이 다양한 하중 속도에 따른 직접인장실험을 통해서 결정되었다. 동정상승계수를 이용하여 하중 속도가 증가함에 따른 강도 증가를 표현하였고 이를 실험결과와 비교하였다. 다음으로 느린 하중속도와 빠른 하중속도에 따라 단순 콘크리트 보와 철근 콘크리트 보에 대한 휨 실험을 수행하였으며, 하중 속도에 따라서 서로 다른 균열 패턴을 관찰할 수 있었다. 빠른 하중은 보의 파괴가 국부적으로 나타나게 만드는데, 이는 속도 의존적 재료의 특성 때문이다. 구조적인 측면에서, 보강재는 느린 하중속도에서 균열의 크기를 줄이고 연성을 높이는 데 큰 영향을 미친다. 본 논문은 속도 의존적 거동에 대한 이해와 동적하중에 대한 보강효과를 제시한다.

keywords : 동적파괴, 철근콘크리트, 속도 의존성, rigid-body-spring network, 점소성 파괴모델

1. 서 론

동적 조건에서, 구조적인 재료는 하중 속도에 영향을 받는다. 특히 콘크리트 구조물은 하중속도에 따라 파괴 모드와 균열 패턴이 변하는 것을 실험적으로 확인할 수 있다(Shah 등, 1987; Kulkarni 등, 1998). 콘크리트의 속도 의존성은 다양한 하중 조건에서 실험되었으며(Takeda 등, 1962; Hughes 등, 1972; Ross 등, 1989; Grote 등, 2001), 속도 의존적 파괴 거동에서 나타날 수 있는 강도상승효과를 동적상승계수(DIF)로 표현한다.

본 연구에서는 콘크리트 재료의 속도 의존성뿐만 아니라, 하중속도가 철근 콘크리트 구조물의 파괴거동에 미치는 영향을 수치해석을 통해 이해한다. 콘크리트 재료에서 내부 힘과 변위 사이의 관계를 계산하기위해 rigid-body-spring network(RBSN)를 사용하였다(Bolander 등, 1998; Yip 등, 2005). 속도 의존성은 RBSN의 스프링요소에서 점소성 손상모델로 구현되며, RBSN을 이용해 철근보강재의 요소를 semi-discrete 모델로 표현하였다. 보강요소는 RBSN 요소에 병렬구조로 스프링에 보강재의 강성을 추가하여 표현하였다.

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 yunmook@yonsei.ac.kr
** 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 kunhwi@yonsei.ac.kr
*** 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 suyeol@yonsei.ac.kr

2. 직접 인장 실험

점소성 거동은 Perzyna 형태의 구성 관계식으로 식 (1)을 사용한다.

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{\langle f(\sigma) \rangle}{\hat{E}} \right]^N \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \quad (1)$$

$$f(\sigma) := |\sigma| - \sigma_Y$$

여기서, τ 는 완화시간이고 N 은 적합상수로서 직접 인장 실험을 통해 결정될 계수들이다. \hat{E} 는 손상된 스프링의 탄성계수를 의미하고 σ_Y 는 항복응력이다. Macaulay 함수에 의해서 정의된 $\langle f \rangle := (f + |f|)/2$ 을 사용하였다. 점소성 계수 τ 와 N 을 보정하기 위해 그림 1과 같이 100×50 mm 크기의 직사각형 시편을 이용하여 직접 인장 실험을 하였다. 회색으로 표현된 10개의 입자들로 양쪽 끝부분을 경계 조건으로 정의하였다. 식 2와 같이 변형속도를 제어하는 $P(t)$ 에 따라 인장력이 가해지는 방향으로 오른쪽 부분은 이동한다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{P}(t)}{E \sum A_e} \quad (2)$$

여기서 $\dot{P}(t)$ 는 하중속도이며, $\sum A_e$ 는 오른쪽 끝부분의 최종 경계부분 면적의 합을 의미한다. 해석 중 반작용력이 측정되는 왼쪽 부분은 고정되어 있으며, 동적강도 증가를 측정하고자 10^{-2} , 10^0 , 10^1 그리고 10^2 s^{-1} 의 변형 속도에 대해서 해석을 수행하였다. 최종 경계부분의 면적의 합으로 오른쪽 끝부분에서 측정된 반력의 합을 나누어서 응력 반응을 계산하였고, 최대응력반응에서 인장강도를 계산하였다. 인장강도의 증가는 DIF를 이용하여 평가하였으며, 여기에서 사용된 $f_t = 4.3$ MPa이고, 경험적 값으로 탄성계수 $E = 32.9$ GPa, 밀도 $\rho = 2400$ kg/m³, 그리고 파괴 에너지 $G_F = 100.5$ N/m을 사용하였다(Mehta 등, 1993).

그림 2는 해석을 통해 결정된 DIF값을 실험 결과 및 경험식(Ross 등, 1989)과 비교한 그래프이다. 기존의 결과와 curve fitting을 통해 점소성 계수는 $\tau = 1.6 \times 10^{-8}$ 과 $N = 2.0$ 으로 결정되었다.

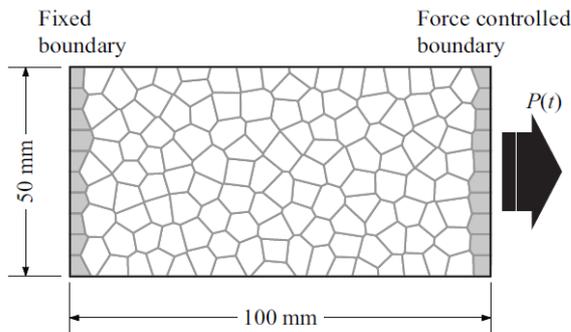


그림 1 직접 인장 실험 시편의 도식

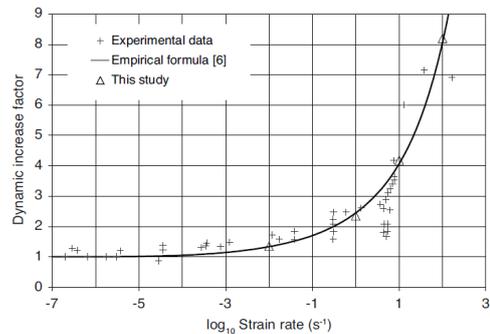


그림 2 인장 강도의 동적 증폭 계수

3. RC 보 휨 실험

이 장에서는 RC 보의 파괴 모드에 대한 속도 효과에 대해서 분석하였다. Kulkarni 등(1998)에 의해 제안된 전단 보강 철근이 없는 철근비 1.38의 단순철근 보를 이용하였다. 그림 3과 같이 하중조건은 변위 제어를 통한 4점 휨 조건을 적용하였다. 수치실험은 0.003 s^{-1} 의 낮은 변형속도와 0.3 s^{-1} 의 빠른 변형속도에서 수행되었으며, 보의 윗부분에 균일한 속도로 하중이 가해졌다. 콘크리트의 물성 값은 직접 인장 실험과 같은 값

을 사용하였으며, 보강철근은 탄성 이후 완벽하게 소성거동을 한다고 가정하였다. 탄성계수는 200 GPa을 사용하였고, 항복 강도는 518 MPa으로 설정하였다.

그림 4는 하중속도에 따른 하중 변위 곡선을 보여준다. 최대 하중은 빠른 하중속도에서 더 큰 것으로 관찰되는데, 이는 콘크리트의 동적강도의 증가로 인한 것으로 판단된다. 빠른 속도에서 연성 파괴가 나타나는 것을 곡선에서 확인할 수 있다. 이러한 특징은 그림 5와 같이 파괴단계의 균열패턴에서 잘 나타난다. 느린 속도에서는 전단 파괴가 발생하지만 빠른 속도에서는 휨 파괴가 발생한다. 이러한 파괴모드는 기존에 실험 (Shah 등, 1987)과는 큰 차이를 보인다. Kulkarni와 Shah(1998)는 빠른 속도의 하중 변위곡선에서는 항복 평탄부(plateau)가 나타나지 않는다는 것을 지적하였다. 이 현상의 원인으로 보강철근의 국부적인 항복에 의한 것으로 생각했다. 그들은 이러한 가설을 확인하기 위해서, 두 줄의 보강 철근으로 평균적인 응력-변형률 곡선을 수정하였고, 빠른 변형속도에서 부분적인 분석을 수행하였다. 하지만, RBSN의 접근 방식은 모델의 discrete한 특성으로 구성 관계식의 수정 없이 기존에 제시된 모델로서 균열 주변 보강철근의 국부적인 항복을 쉽게 표현한다.

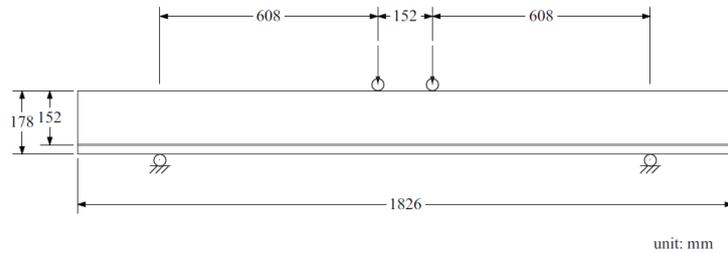


그림 3 RC보 시편의 4점 휨 실험 배치

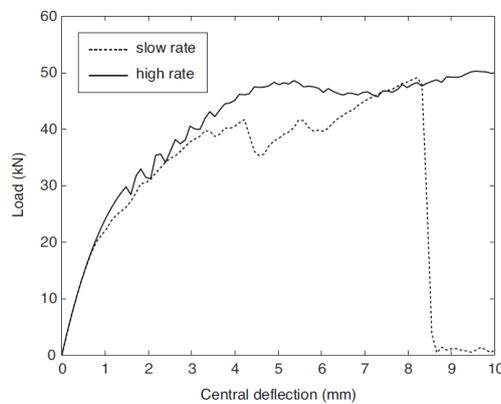
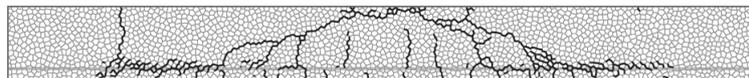
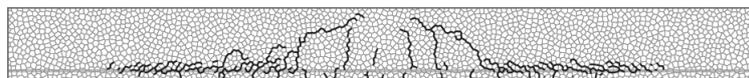


그림 4 느린 하중속도와 빠른 하중속도에서의 하중 변위 곡선



(a) 느린 속도



(b) 빠른 속도

그림 5 RC보 시편의 균열 패턴

3. 결론

본 연구는 동적하중을 받는 콘크리트 재료 및 구조물에 대한 수치 실험을 제시하였다. 속도 의존적 파괴 거동은 RBSN을 이용하여 점소성 손상모델을 구현하였다. Semi-discrete 보강 요소가 위치하는 부분에 인접하는 입자를 연결하여 보강 철근을 나타내었다. 다양한 변형 속도에 대해서 직사각형 시편으로 직접 인장 실험을 수행하였으며, 인장강도의 증가를 DIF에 의해서 표현하였다. 이를 실험결과와 비교하여 구성관계모델의 점소성 계수를 보정하였다. 중간정도의 a/d 비율을 가진 RC보에 2가지의 하중속도를 적용시켜 4점 휨 실험을 수행하였다. 파괴모드는 하중속도가 증가함에 따라 연속적으로 변하는 경향을 나타내었고, 기존의 관측과는 다른 결과를 보여주었다. 이는 빠른 속도에서 보강철근의 국부적인 항복에 의한 것으로 판단되며, RBSN의 개별특성 및 semi-discrete 보강요소로 손쉽게 표현할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 LNG플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- S. P. Shah, M. L. Wang, and L. Chung. (1987) Model concrete beam-column joints subjected to cyclic loading at two rates. *Materials and Structures*, 20(2):85 - 95.
- S. M. Kulkarni and S. P. Shah. (1998) Response of reinforced concrete beams at high strain rates. *ACI Structural Journal*, 95(6):705 - 715.
- J. Takeda and H. Tachikawa. (1962) The mechanical properties of several kinds of concrete at compressive, tensile, and flexural tests in high rates of loading. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 77:1 - 6.
- B. P. Hughes and R. Gregory. (1972) Concrete subjected to high rates of loading in compression. *Magazine of Concrete Research*, 24(78):25 - 36.
- C. A. Ross, P. Y. Thompson, and J. W. Tedesco. (1989) Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression. *ACI Materials Journal*, 86(5):475 - 481.
- D. L. Grote, S. W. Park, and M. Zhou. (2001) Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization. *International Journal of Impact Engineering*, 25(9):869 - 886.
- J. E. Bolander and S. Saito. (1998) Fracture analyses using spring networks with random geometry. *Engineering Fracture Mechanics*, 61(5-6):569 - 591.
- M. Yip, J. Mohle, and J. E. Bolander. (2005) Automated modeling of three-dimensional structural components using irregular lattices. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(6):393 - 407.
- P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro. (1993) *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, pages 85 - 86. Prentice Hall.