

P-I 곡선을 이용한 충격압력하중을 받는 철근 콘크리트 보의 손상해석

Damage Analysis of RC Beams Subjected to Blast Load Using P-I Diagram

조정희* 남진원** 김호진** 최형진*** 송하원**** 변근주****
Cho, Jung-Hee Nam, Jin-Won Kim, Ho-Jin Choi, Hyung-Jin Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

Since the behavior of structural members subjected to blast load shows different responses, the effect of impulse as well as peak load should be considered in the damage analysis. The threshold on P-I diagram that causes specific damage level divides the diagram into the failure zone and the non-failure zones. In this study, numerical analysis is performed based on single-degree-of-freedom (SDOF) techniques to generate rational P-I diagram considering material non-linearity and dual failure modes (flexure and direct shear) of RC beams. From the comparison with existing test results it is concluded that proposed numerical method is good to derive failure mode of RC beam under blast load.

1. 서론

충격압력하중을 받는 구조부재의 거동을 정확하게 해석하기 위해서는 가해지는 하중의 크기뿐만 아니라 하중과 지속시간에 의해 결정되는 충격량의 영향도 고려하여야 한다. 구조물에 동일한 수준의 손상을 일으키는 하중과 충격량의 조합을 나타내는 도표를 도출하기 위한 기존의 유한요소해석방법은 상당한 계산시간을 요하며, 경험적 해석방법은 신속한 계산이라는 장점에도 불구하고 대상구조의 거동에 대한 지나친 가정으로 인하여 해석결과의 신뢰성에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 철근콘크리트 보의 비선형 거동 및 다중파괴모드를 고려함으로써 합리적인 P-I 도표를 신속하게 도출할 수 있는 수치해석기법의 개발을 시도하였다.

* 정회원, (주)한국해의기술공사

** 정회원, 연세대학교 토목공학전공 박사과정

*** Senior Engineer, Karagozian & Case (Ph. D.)

**** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

2. 충격압력하중의 생성

일반적으로 폭발에 의해서 고체 또는 액체상태의 물질은 상당한 고온·고압 상태의 고압가스로 전환되며, 짧은 순간에 팽창한 이 가스의 부피가 공기 중에서 충격파로 구조물에 작용하게 된다. 폭발반응에 의해 생성된 충격압력하중은 반응 진원지로부터 바깥방향으로 전달되며 이때 하중의 크기는 폭발의 크기, 대상 구조물에 대한 상대적 위치(구속 또는 비구속), 구조의 기하학적 형상, 그리고 폭발에 대한 구조물의 방향이나 지면에 대한 폭발의 상대적 위치(지상폭발, 지면상에서의 폭발, 지하폭발) 등에 의해 결정된다. 파가 팽창하는 동안 파의 전면이 먼저 진로방향에 위치한 구조부재에 도달하여 일차적으로 영향을 미치고, 그 후 부재전체가 충격압력 속으로 빠져들게 된다. 구조물에 대한 충격압력하중의 크기와 분포는 폭발물의 종류, 구조물에 대한 폭발의 위치, 지상 지장물 또는 구조물 자체와의 상호작용으로 인한 압력의 크기 등의 함수로 표현할 수 있다. 그림 1과 그림 2의 충격압력하중과 (ASCE, 1999)는 그림 3과 같이 이상화하여 해석에 적용하였다.

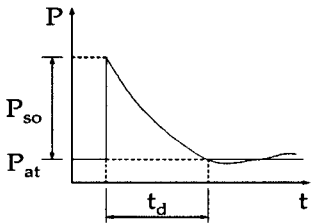


그림 1 충격압력하중의 충격파

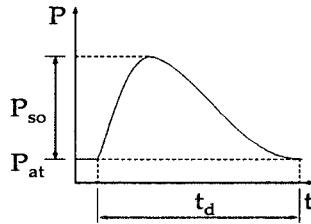


그림 2 충격압력하중의 압력파

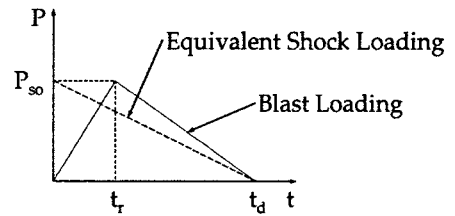


그림 3 이상화한 등가 충격압력하중(ASCE, 1995)

3. 하중-충격량에 의한 동적해석

정압력에 대한 충격량(I_0)은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_0 = \int_0^{t_d} P(t) dt \quad (1)$$

여기서, $P(t)$ 는 충격압력하중 함수, t_d 는 정압력의 지속시간이다. 충격파의 지속시간이 대상 구조물의 고유주기 보다 훨씬 작게 나타나는 경우에는 구조물의 손상이 충격파에 의해 발생하는 최고 압력 보다는 충격량에 의해 지배받게 된다, 따라서, 지속시간이 매우 짧은 충격압력하중에 대하여 구조물의 손상을 예측할 수 있는 하중-충격량 곡선을 생성하기 위하여 외부일(W^{ext})과 내부에너지(U)의 평형으로부터 다음 식 (2)-(4)와 같이 스펙트럼을 유도한다.

$$W^{ext} = P_o x_{max} \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{2} Kx_{max}^2 \quad (3)$$

$$\frac{x_{max}}{P_o/K} = \frac{1}{2} \omega t_d \quad (4)$$

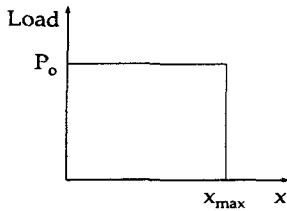


그림 4 준정적 재하함수(Mays and Smith, 1995)

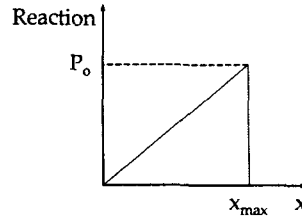


그림 5 준정적 하중에 대한 내력함수 (Mays and Smith, 1995)

여기서, $\omega(=\sqrt{K/M})$ 는 고유회전진동수이다. 고유회전진동수를 위의 식 (4)에 대입하여, 유도한 스펙트럼으로부터 P-I 도표를 다음 그림 6과 같이 생성할 수 있다.

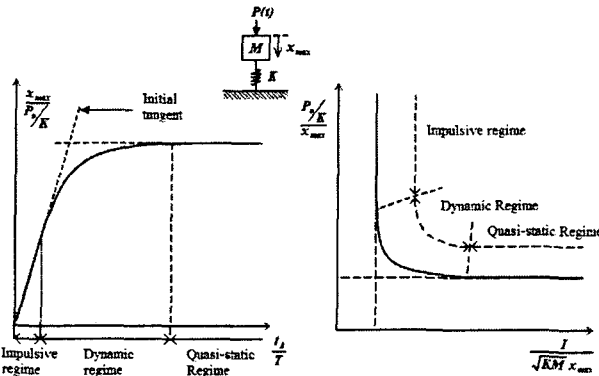


그림 6 응답 스펙트럼과 P-I 도표 (Soh and Krauthammer, 2004)

4. 수치해석방법을 이용한 철근콘크리트 보의 P-I 해석

4.1 철근콘크리트 보의 재료모델과 거동

철근콘크리트 보의 재료 비선형성을 해석에 고려하기 위하여 보를 구성하는 콘크리트와 철근에 대하여 각각 Hognestad et al. (1955)의 콘크리트 구성모델과 탄성-완전소성 철근 구성모델을 적용하였다. 또한, 대상 철근콘크리트 보의 휨에 대한 단면해석을 통하여 직접 구한 하중-처짐 곡선과 Krauthammer et al. (1986)의 직접전단 모델을 대상 철근콘크리트 보의 P-I 해석에 도입하였다. 도입한 휨과 직접전단 모델에 대하여 각각의 독립적인 등가 단자유도시스템을 구성하였으며, 이를 통해 등가 단자유도시스템이 실제 철근콘크리트 보의 거동을 보다 정확하게 묘사할 수 있게 되었다.

4.2 철근콘크리트 보의 P-I 도표

충격압력하중을 받는 실제 철근콘크리트 보의 파괴 경계선을 적절히 표현하기 위해서는 반드시 휨 거동과 직접전단 거동을 모두 고려한 다중파괴모드 P-I 도표를 생성하여야 한다. 휨과 직접전단에 대한 두 경계선이 이루는 최종 하한선은 휨 파괴와 직접전단 파괴의 두 파괴모드 모두를 고려한 다중 파괴모드 P-I 곡선이 된다. 또한, 수치해석방법에 도입한 직접전단 동적내력함수를 실험결과와 비교하여 도입한 직접전단 모델의 타당성을 검증하였다.

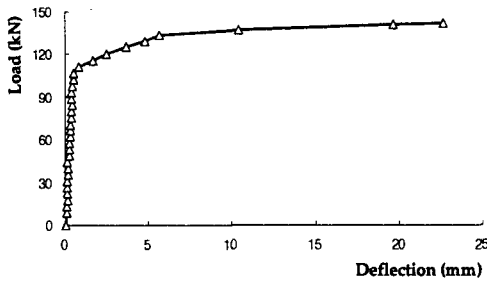


그림 7 철근콘크리트 보의 하중-처짐

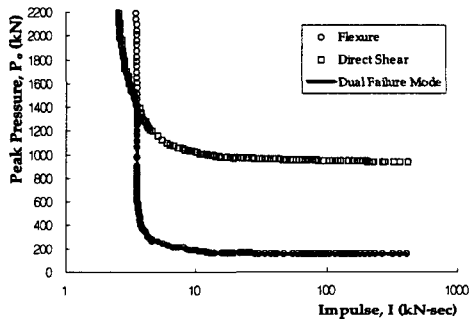


그림 9 철근콘크리트 보의 다중파괴모드 P-I 도표

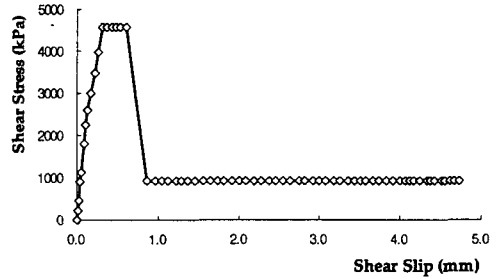


그림 8 철근콘크리트 보의 직접전단-전단변위 (Krauthammer et al., 1986)

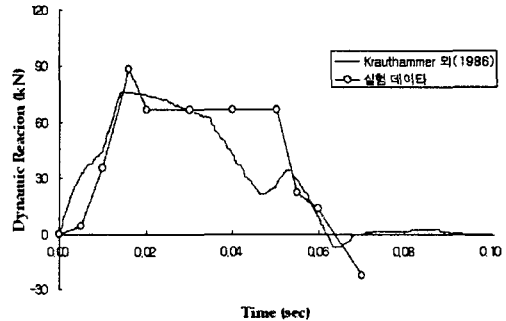


그림 10 직접전단 힘수와 실험의 비교 (Feldman and Siess, 1958)

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 충격압력하중에 의한 구조물의 손상여부를 평가하고 예측하기 위하여 등가 단자유도 시스템과 동적 구성모델을 기초로 합리적인 P-I 도표를 생성할 수 있는 수치해석방법을 개발하였다.
- (2) 콘크리트의 비선형성을 반영한 수치해석방법을 도입하여 철근콘크리트 보의 합리적인 P-I 도표를 제시하였으며, P-I 도표로부터 파괴를 지배하는 응답모드의 범위를 도출하였다.

참고문헌

1. Biggs, J. M., 1964, Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill.
2. Feldman, A. and Siess, C. P., 1958, "An Investigation of Resistance and Behavior of Reinforced Concrete Members Subjected to Dynamic Loading, part III," University of Illinois at Urbana-Champaign.
3. Mays, G. C. and Smith, P. D., 1995, Blast Effect on Buildings, Thomas Telford.
4. Hognestad, E. and Hanson, N. W., 1955, "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," ACI Journal, Vol.52, No.4.
5. Soh, T. B. and Krauthammer, T., 2004, "Load-Impulse Diagrams of Reinforced Concrete Beams Subjected to Concentrated Transient Loading," The Pennsylvania State University.
6. ASCE, 1999, Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, Task Committee on Blast Resistant Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the ASCE.
7. Krauthammer, T., Bazeos, N., and Holmquist, T. J., 1986, "Modified SDOF Analysis of RC Box-Type Structure," Journal of Structural Engineering, ASCE.