

국부충격에 의한 전단건물의 손상곡선

Damage Curves for the Shear Building to the Local Impact

이 상 호*

Lee, Sang-Ho

황 신 우**

Hwang, Sin-Woo

Abstract

The damage curves for the 2-story shear building to the impulsive rectangular loads were established with the peak load and impulse ratio producing the critical displacement. The convolution integrations with the impulse response matrix and the loads were used to find the responses of the building. The impulse response matrix required in the calculations of the convolution integration were found with the mode superposition method. It is shown from the established damage curves that the responses of the top and bottom floor are sensitive to the magnitude and the impulse of the loads respectively.

요 지

하층충격에 의한 2층 전단건물의 손상곡선을 임계변위를 발생시키는 하중최대치 비와 임펄스 비를 이용하여 작성하였다. 손상곡선 작성에 필요한 구조물의 거동파악은 하중과 임펄스 응답행렬의 합성곱을 이용하여 구하였으며, 합성곱에 필요한 임펄스응답행렬은 모드중첩법을 이용하여 구하였다. 작성된 손상곡선으로부터 하층충격에 의한 각층의 안전성은 상층은 하중의 최대치에 그리고 하층은 임펄스의 크기에 민감한 것으로 파악되었다.

Keywords : Damage Curves, Shear Building, Impulse

핵심 용어 : 손상곡선, 전단건물, 임펄스

* 정희원, 단국대학교 공학부 토목환경공학전공 교수
** 정희원, 단국대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

E-mail shlee@dankook.ac.kr 019-635-3525

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

폭발이나 발파로 인한 충격, 파도에 의한 충격, 자동차의 충돌 등으로 인해 발생한 하중은 높은 압력을 발생시키며 순간적으로 종료하는 특성을 갖는다. 충격 하중에 대한 다자유도 구조물이나 연속체 구조물의 안전성 검토 절차는 우선 충격하중의 특성을 파악하고, 충격하중에 의한 구조물의 붕괴형상(failure mode)을 파악한 후, 붕괴형상에 근거한 수학적 모델의 계수와 저항함수(resistance function)를 결정함으로써 이루어진다^{(3) (5) (6), (7)} 그러나 많은 자유도를 갖는 실제 구조물이나 연속체 구조물의 거동상태는 서로 다른 위상각을 갖는 여러 모드의 합성으로 구성되어 있어, 실제 구조물을 단자유도 계로 해석하는 방법은 많은 오차를 유발시킨다 또한, 서로 다른 위치에 국부적으로 작용하는 충격하중에 대한 안전성을 검토하기 위해서는 구조물을 이루고 있는 모든 부재의 안전성을 각각의 충격하중에 대해 검토하여야 한다

높은 압력을 발생시키며 순간적으로 종료하는 특성을 갖는 충격하중에 의한 구조물의 거동은 초기속도에 의한 자유진동으로 볼 수 있으며 이때 초기속도의 크기는 충격하중의 임펄스에 의해 결정된다 초기속도의 크기를 결정짓는 이러한 임펄스는 하중-시간 곡선하의 면적으로 정의되기 때문에 충격하중에 의한 구조물의 거동은 하중의 형태와 크기 그리고 하중작용시간에 의해 영향을 받게 된다 따라서 충격하중이 작용하는 구조물의 안전성은 하중의 최대치와 임펄스를 변수로 사용하여 검토할 수 있다⁽²⁾

구조물의 일부에 국부적으로 작용하는 충격하중에 대한 구조물의 안전성을 일괄적으로 검토하기 위해서는 충격하중의 최대치와 임펄스를 변수로 사용하여 손상기준을 설정하고, 설정된 손상기준에 의해 국부적으로 작용하는 충격하중에 대한 각 부재의 손상곡선을 작성하여야 한다 본 연구에서는 2층 전단건물의 하중에 국부적으로 작용하는 충격하중에 대한 각 층의 손상곡선을 작성하여, 충격하중에 대한 다자유도 구조물의 안전성을 파악할 수 있는 방법을 제시 하고자 하며, 제시된 방법은 하중의 동적 특성과 구조물의 동적 특성이 함께 고려된 방법으로 구조물의 일부에 국부적

으로 작용하는 충격하중에 대한 구조물의 안전성을 일괄적으로 파악할 수 있는 방법이다 또한 작성된 손상곡선을 이용하여 구조물의 국부에 작용하는 충격하중의 임펄스와 하중의 크기가 구조물의 거동에 미치는 영향을 분석한다 손상곡선을 작성하기 위한 충격하중의 형태로는 사각형 형태의 하중을 사용한다

모든 구조물은 사용기간 중에 여러 형태의 동하중이 작용한다 동하중은 형태에 따라 주기하중과 비 주기하중이 있으며, 그중, 비 주기하중인 충격하중은 발생하는 응답형태, 해석방법에 있어 주기하중과 구별된다 또한, 주기하중이 작용하는 구조물에는 감쇠효과(damping effect)가 크게 작용하는 정상상태 응답(steady state response)이 중요하나, 충격하중과 같이 단기에 종료하는 하중이 작용하는 경우에는 감쇠에 의한 에너지 흡수기능이 효과적으로 작동하기 전에 최대치가 발생하기 때문에 비 감쇠를 적용한다

동하중이 작용하는 다자유도 구조물의 해석방법에는 다양한 시간영역과 진동수영역의 해석방법이 있으나, 주기하중이나 지진하중에 대한 해석과는 달리 충격하중과 같이 단기에 종료하는 하중에 대한 해석은 임펄스응답행렬과 하중의 합성곱(convolution)을 이용하는 것이 편리하다 여기서 임펄스응답행렬은 단위이상 임펄스(unit ideal impulse)가 작용할 때 각 자유도에 발생한 변위이다

2. 해석이론

다자유도 구조물의 운동 방정식은 다음과 같다

$$[M]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\} \quad (1)$$

운동방정식을 상태방정식(state equation)으로 변환시키면(1),(4) 아래 식 (2)와 같다.

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + [B]\{u\} \quad (2)$$

여기서 $\{x\}$ 는 각 자유도의 변위와 속도로 이루어진 상태변수벡터이며, $\{u\}$ 는 하중으로 이루어진 입력벡터

이다. 출력 방정식(output equation)은 다음 식 (3)과 같다.

$$\{y\} = [C]\{x\} + [D]\{u\} \quad (3)$$

출력방정식의 출력벡터 $\{y\}$ 는 속도, 변위, 탄성에너지 등[●]로 이루어지며, 출력은 임펄스응답행렬(impulse response matrix) $[h]$ 와 입력 $\{u\}$ 의 합성곱(convolution)을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다

$$\{y\} = [h]*\{u\} \quad (4)$$

3. 임펄스응답행렬

출력 $\{y\}$ 를 합성곱으로 구하기 위해서는 임펄스응답행렬을 구하여야 하며 임펄스응답행렬의 요소는 단위이상임펄스(unit ideal impulse)가 작용할 때 각 자유도에 발생된 변위로 정의된다 따라서 임펄스응답행렬은 단위 이상임펄스가 작용하는 구조물의 거동으로부터 구할 수 있으며 구조물의 거동은 모드중첩법을 이용하여 구할 수 있다.

모드중첩법에서는 모드진폭을 곱한 각 모드의 선형 조합으로 구조물의 거동이 이루어지며 아래와 같이 표현된다

$$\{x\} = [\Phi]\{Y\} \quad (5)$$

여기서 $[\Phi]$ 는 모드형상행렬이다 식(5)를 운동방정식 (1)에 대입하고 모드형상행렬의 전치행렬 $[\Phi]^T$ 을 운동방정식의 좌 우변의 앞에 곱하면 다음과 같이 식 (6)을 유도 할 수 있다

$$[M^*]\{\ddot{Y}\} + [K^*]\{Y\} = \{P^*\} \quad (6)$$

여기서, $[M^*]$, $[K^*]$, $\{P^*\}$ 는 각각 일반화 질량행렬(generalized mass matrix), 강성행렬, 하중벡터이다

식 (6)의 일반화 질량행렬과 일반화 강성행렬은 각 모드간의 직교성(orthogonal property)으로 인하여 대각행렬로 나타나며, 대각행렬의 특성을 이용하면 식(6)은 다음 식 (7)과 같이 각 모드의 진폭이 변수로 사용된, 단자유도 계의 운동방정식과 동일한 형태를 갖는 n 개의 식으로 나타난다 여기서 n 은 자유도의 수이며 모드진폭 Y_i 를 정규좌표(normal coordinate)라 한다

$$M_i^* \ddot{Y}_i + K_i^* Y_i = P_i^* \quad , \quad i=1,2, \dots, n \quad (7)$$

구조물에 충격이 가해질 때 충격하중의 임펄스는 초기속도의 형태로 나타난다 따라서 순간적으로 종료하는 이상임펄스에 의한 구조물의 거동은 초기속도에 의한 자유진동으로 볼 수 있으며, 자유진동의 경우 식 (7)의 해는 다음과 같다.

$$Y_i = \frac{\dot{Y}_i(0)}{\omega_i} \sin \omega_i t + Y_i(0) \cos \omega_i t \quad (8)$$

여기서, ω_i 는 i 번째 모드의 고유진동수이며 $Y_i(0)$ 와 $\dot{Y}_i(0)$ 는 각각 정규좌표의 초기변위와 속도로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Y_i(0) = \frac{1}{M_i^*} \{\Phi_i\}^T [M]\{x(0)\} \quad (9)$$

$$\dot{Y}_i(0) = \frac{1}{M_i^*} \{\Phi_i\}^T [M]\{\dot{x}(0)\} \quad (10)$$

이상임펄스에 의한 구조물의 거동은 이상 임펄스가 작용하는 특정 자유도의 초기속도에 의한 자유진동이다 따라서 식 (9)의 정규좌표의 초기 변위는 0이 되며 또한 특정 자유도에만 이상임펄스가 작용하면 이상 임펄스가 작용하지 않는 다른 자유도의 초기속도 역시 0이 된다 따라서 자유도 j 에만 단위이상임펄스가 작용할 경우에는 식 (10)의 초기속도벡터의 j 번째 열은 $1/m_j$ 이 되며 나머지는 모두 0이 되므로 식 (10)은 다음과 같이 된다 식 (10)에서 질량행렬은 대각행렬이다

$$\dot{Y}_i(0) = \frac{\phi_n}{M_i^*}$$

모든 자유도에 이와 같이 단위이상임펄스를 차례로 작용시키면 정규좌표의 초기속도 값으로 이루어진 행렬 $[\dot{Y}(0)]$ 을 만들 수 있으며, 행렬의 요소는 아래와 같다

$$\dot{Y}_v(0) = \frac{1}{M_i^*} [\phi]^T [M] [x(0)] \quad (11)$$

식 (11)에서 행렬 $[x(0)]$ 은 i 번째 대각요소가 $1/m_i$ 인 대각행렬이다 또한, 질량행렬이 대각행렬인 경우 식 (11)은 다음과 같이 된다

$$\dot{Y}_v(0) = \frac{\phi_n}{M_i^*} \quad (12)$$

식 (7)에서 Y_i 는 i 번째 모드의 진폭으로, n 개의 자유도로 이루어진 구조물은 n 개의 모드진폭으로 이루어진 해를 갖는다 모든 자유도에 단위이상임펄스를 차례로 작용시키면 n 개의 모드진폭으로 구성된 $n \times n$ 행렬 $[Y]$ 를 만들 수 있다 단위이상임펄스를 모든 자유도에 차례로 작용시키어 대각행렬 $[Y]$ 의 요소를 구하면 아래와 같다

$$Y_{ij} = \frac{\phi_n}{\sqrt{M_i^* K_i^*}} \sin \omega_i t \quad (13)$$

식 (4)의 출력을 구하는데 필요한 임펄스응답행렬의 요소 h_{ij} 는 자유도 j 에 작용하는 단위 이상임펄스로 인해 자유도 i 에 발생하는 변위로 정의되며, 임펄스응답행렬 $[h]$ 는 식 (13)과 식 (5)의 중첩원리를 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다

$$[h] = [\phi][Y] \quad (14)$$

4. 충격하중에 의한 거동

Fig 1에는 2 자유도 구조물이 나타나 있으며 구조물의 질량과 강성행렬은 아래와 같다

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix}$$

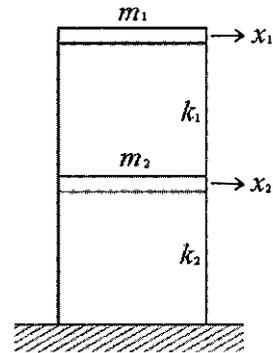


Fig 1 전단빌딩

Fig. 1에 나타난 구조물에 대한 상태방정식 (2)의 상태변수(state variables)와 입력(inputs)은 아래와 같으며,

$$\{x\} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}, v_1 = \dot{x}_1, v_2 = \dot{x}_2, \{u\} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}$$

행렬 $[A]$ 와 $[B]$ 는 다음과 같다

$$[A] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_2} & \frac{k_1 + k_2}{m_1} & 0 & 0 \end{pmatrix} [B] = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & 0 \\ \frac{1}{m_2} & 0 \end{pmatrix}$$

각 자유도의 변위를 출력으로 사용할 경우 식 (3)의 항들은 다음과 같다.

$$(y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

따라서 각 층의 변위는 식 (4)를 이용하여 임펄스 응답행렬과 하층의 합성곱으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_1 = h_{11} * p_1 + h_{12} * p_2$$

$$x_2 = h_{21} * p_1 + h_{22} * p_2$$

아래의 Fig 2는 Fig. 1에 나타난 구조물의 임펄스 응답행렬을 구하기 위한 그림이다 그림에서 상층과 하층에 단위이상임펄스가 작용하는 것을 볼 수 있으며, 단위이상임펄스에 의한 각 층의 변위가 임펄스 응답행렬의 요소가 된다

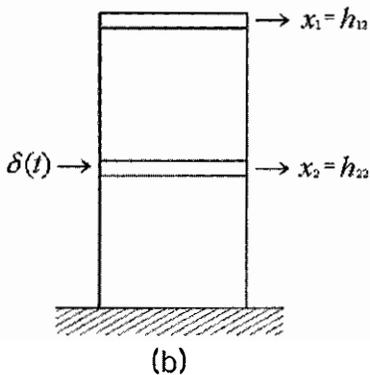
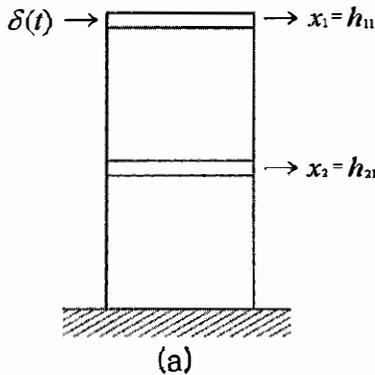


Fig 2 임펄스응답행렬

식 (13)을 이용하여 Fig. 1에 나타난 구조물에 대한 행렬 $[Y]$ 를 구하면 다음과 같다

$$[y] = \begin{bmatrix} \frac{\phi_{11}}{\sqrt{M_1^* K_1^*}} \sin \omega_1 t & \frac{\phi_{21}}{\sqrt{M_1^* K_1^*}} \sin \omega_1 t \\ \frac{\phi_{12}}{\sqrt{M_2^* K_2^*}} \sin \omega_2 t & \frac{\phi_{22}}{\sqrt{M_2^* K_2^*}} \sin \omega_2 t \end{bmatrix}$$

식 (14)를 이용하여 임펄스응답행렬 $[h]$ 를 구하면 다음과 같다

$$[h] = \begin{bmatrix} \frac{\phi_{11}^2}{\sqrt{M_1^* K_1^*}} \sin \omega_1 t + \frac{\phi_{12}^2}{\sqrt{M_2^* K_2^*}} \sin \omega_2 t & \frac{\phi_{11} \phi_{21}}{\sqrt{M_1^* K_1^*}} \sin \omega_1 t + \frac{\phi_{12} \phi_{22}}{\sqrt{M_2^* K_2^*}} \sin \omega_2 t \\ \frac{\phi_{21} \phi_{11}}{\sqrt{M_1^* K_1^*}} \sin \omega_1 t + \frac{\phi_{22} \phi_{12}}{\sqrt{M_2^* K_2^*}} \sin \omega_2 t & \frac{\phi_{21}^2}{\sqrt{M_1^* K_1^*}} \sin \omega_1 t + \frac{\phi_{22}^2}{\sqrt{M_2^* K_2^*}} \sin \omega_2 t \end{bmatrix} \quad (15)$$

계산의 간편을 위하여 Fig 1에 나타난 구조물 각 층의 질량과 강성을 각각 m 과 k 로 동일하게 놓으면 질량행렬과 강성행렬은 다음과 같다

$$[M] = m \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [K] = k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$$

고유진동수와 모드형상은 다음과 같다.

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2}(3 - \sqrt{5})k/m, \omega_2^2 = \frac{1}{2}(3 + \sqrt{5})k/m$$

$$[\Phi] = [\Phi_1 \ \Phi_2] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{2}(\sqrt{5}-1) & -\frac{1}{2}(\sqrt{5}-1) \end{bmatrix}$$

모드형상을 이용하여 일반화 질량행렬과 강성행렬을 구하면 다음과 같다

$$[M^*] = \frac{m}{2} \begin{bmatrix} (5-\sqrt{5}) & 0 \\ 0 & (5+\sqrt{5}) \end{bmatrix},$$

$$[K^*] = k \begin{bmatrix} 5-2\sqrt{5} & 0 \\ 0 & 5+2\sqrt{5} \end{bmatrix}$$

임펄스응답행렬의 요소들은 식 (15)를 이용하여 구하면 아래와 같다

$$h_{11}(t) = \frac{1}{\sqrt{mk}} (1.171 \sin \omega_1 t + 0.171 \sin \omega_2 t)$$

$$h_{21}(t) = \frac{1}{\sqrt{mk}} (0.724 \sin \omega_1 t - 0.276 \sin \omega_2 t)$$

$$h_{12}(t) = \frac{1}{\sqrt{mk}} (0.724 \sin \omega_1 t - 0.276 \sin \omega_2 t)$$

$$h_{22}(t) = \frac{1}{\sqrt{mk}} (0.447 \sin \omega_1 t + 0.447 \sin \omega_2 t)$$

계단하중, 이상임펄스, 사각형 형태의 하중에 의한 각층의 거동은 식 (4)와 같이 임펄스응답행렬과 하중의 합성곱을 이용하여 구할 수 있다

4.1 계단하중

계단하중은 하중작용시간이 무한대로 긴 하중으로 임펄스는 무한대 값을 갖으며, 하중의 크기는 P 인 하중이다. 이러한 계단하중이 하층에 작용하면 각 층의 변위는 합성곱을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다

$$x_1(t) = h_{12} * P = \frac{P}{k} (1 - 1.171 \cos \omega_1 t + 0.171 \cos \omega_2 t) \quad (16)$$

$$x_2(t) = h_{22} * P = \frac{P}{k} (1 - 0.724 \cos \omega_1 t - 0.276 \cos \omega_2 t) \quad (17)$$

식 (16), (17)을 보면 각층은 동일한 위상각을 갖고 거동하며, 동일한 위상각을 갖기 때문에 상층의 안전을 판단하는데 필요한 상층의 상대변위는 식 (16)과 (17)의 차를 이용하여 구할 수 있다

4.2 이상임펄스

단위 이상임펄스는 하중의 크기는 무한대로 크며, 하중작용시간은 무한소로 짧고, 임펄스는 단위 값을 갖는 하중을 말한다. 이러한 단위 이상임펄스는 $\delta(t)$ 함수의 특성을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t=0 \\ 0, & t \neq 0, \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases}$$

이러한 정의로부터 $\delta(t)$ 함수의 샘플링 특성을 다음과 같이 유도 할 수 있다

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \delta(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi(0) \delta(t) dt \\ &= \phi(0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \phi(0) \end{aligned}$$

즉 임의의 함수와 단위 이상임펄스 곱의 적분 값은 단위 이상임펄스가 존재하는 곳의 함수 값이 된다. $\delta(t)$ 함수의 샘플링 특성과 식 (4)를 이용하여 그림 1에 나타난 구조물의 하층에 작용하는 단위 이상임펄스에 의한 각 층의 변위를 구하면 아래와 같다

$$x_1(t) = h_{12}(t) = \frac{1}{\sqrt{mk}} (0.724 \sin \omega_1 t - 0.276 \sin \omega_2 t) \quad (18)$$

$$x_2(t) = h_{22}(t) = \frac{1}{\sqrt{mk}} (0.447 \sin \omega_1 t + 0.447 \sin \omega_2 t) \quad (19)$$

4.3 사각형하중

하중의 크기가 P 이고 하중작용시간이 t_1 인 사각형 하중에 대한 각 층의 거동은 하중작용구간과 하중 종료후의 자유진동구간으로 나누어 구하여야 한다. 그 중, 하중작용구간의 변위는 계단하중에 의한 변위와

동일하다 하중종료 후 자유진동구간의 거동은 식 (4)의 합성곱을 하중작용구간과 하중종료후의 구간으로 나누어 적분하면 다음과 같다

$$x_1(t) = \frac{P}{k} [1.171\sqrt{2(1-\cos\omega_1 t_1)} \cos(\omega_1 t - \Phi_1) - 0.171\sqrt{2(1-\cos\omega_2 t_1)} \cos(\omega_2 t - \Phi_2)] \quad (20)$$

$$x_2(t) = \frac{P}{k} [0.724\sqrt{2(1-\cos\omega_1 t_1)} \cos(\omega_1 t - \Phi_1) + 0.276\sqrt{2(1-\cos\omega_2 t_1)} \cos(\omega_2 t - \Phi_2)] \quad (21)$$

여기서 Φ_1, Φ_2 는 각 모드에 위상각으로 아래와 같다

$$\tan \Phi_1 = \frac{\sin \omega_1 t_1}{\cos \omega_1 t_1 - 1}, \quad \tan \Phi_2 = \frac{\sin \omega_2 t_1}{\cos \omega_2 t_1 - 1}$$

5. 손상곡선

손상곡선은 임계변위를 발생시키는 이상임펄스와 계단하중을 구한 후, 이들과 동일한 변위를 일으키는 충격하중의 임펄스 비와 하중최대치 비를 이용하여 구할 수 있다 식 (18), (19)에는 하중에 작용하는 단위 이상임펄스에 의한 각층의 변위가 나타나 있다 식으로부터 하중 단위 이상임펄스에 의한 최대변위는 상층의 상대변위에서 발생되며, 상층의 최대 상대변위는 식 (18)에서 식 (19)를 빼어준 차에 나타난 각 모드 진폭의 합으로 구할 수 있다 따라서 하중에 임펄스 값이 I_0 인 이상임펄스에 의해 임계변위가 발생되면 임계변위는 상층에서 발생되며 다음과 같다

$$x_{cr} = \frac{I_0}{\sqrt{mk}} \quad (22)$$

식 (16), (17)에는 하중에 작용하는 계단하중에 의한 각층의 변위가 나타나 있다. 식으로부터 하중에 작용하는 계단하중으로 인한 최대변위는 하층에서 발생되며, 하층의 최대변위는 식 (17)에 나타난 모드진폭

의 합으로 구할 수 있다 따라서 하층에 크기가 P_0 인 계단하중에 의해 임계변위가 발생되면 임계변위는 하층에서 발생되며 다음과 같다

$$x_{cr} = 2 \frac{P_0}{k} \quad (23)$$

임펄스 값이 I 인 이상임펄스가 하층에 작용할 경우 임펄스 비 I/I_0 가 1보다 작으면 손상이 발생되지 않는다 그러나, 1보다 큰 경우에는 상층에 손상이 발생된다. 마찬가지로 크기가 P 인 계단하중이 하층에 작용할 경우 하중 비 P/P_0 가 1보다 작으면 손상이 발생되지 않으나, 크면 하층에 손상이 발생된다 따라서 이러한 원리를 이용하면 충격하중의 임펄스 비와 하중 최대치 비를 사용하여 구조물의 안전성을 검토 할 수 있는 손상곡선을 작성 할 수 있다

5.1 상층 손상곡선

하중에 작용하는 사각형 하중에 의한 상층의 최대 상대변위는 하중종료 후에 발생되며 식 (20)과 (21)의 차에 나타난 모드진폭의 합으로 아래와 같다

$$(x_1 - x_2)_{\max} = \frac{P}{k} \{0.447\sqrt{2(1-\cos\omega_1 t_1)} + 0.447\sqrt{2(1-\cos\omega_2 t_1)}\} \quad (24)$$

식 (24)와 계단하중 P_0 에 의한 임계변위인 식 (23)을 등치시키면 상층 손상곡선의 수직 축 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_r = \frac{2}{0.447\left(\sqrt{2(1-\cos 2\pi \frac{t_1}{\tau_1})} + \sqrt{2(1-\cos 5.236\pi \frac{t_1}{\tau_1})}\right)} \quad (25)$$

식 (24)의 분자와 분모에 하중작용시간 t_1 을 곱하여 이상임펄스 I_0 에 의한 임계변위인 식 (22)와 등

치시키면 상층 손상곡선의 수평축 값을 아래와 같이 구할 수 있다

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_T = \frac{3.236\pi \frac{t_1}{\tau_1}}{0.447 \left(\sqrt{2(1 - \cos 2\pi \frac{t_1}{\tau_1})} + \sqrt{2(1 - \cos 5.236\pi \frac{t_1}{\tau_1})} \right)} \quad (26)$$

5.2 하층 손상곡선

하층에 작용하는 사각형 하중에 의한 하층의 최대변위는 하중종료 후에 발생되며 식 (21)에 나타난 모드진폭의 합으로 아래와 같다

$$(x_2)_{\max} = \frac{P}{k} \{ 0.724\sqrt{2(1 - \cos \omega_1 t_1)} + 0.276\sqrt{2(1 - \cos \omega_2 t_1)} \} \quad (27)$$

식 (27)과 계단하중 P_0 에 의한 임계변위인 식 (23)을 등치시키면 하층 손상곡선의 수직 축 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right)_B = \frac{2}{0.724\sqrt{2(1 - \cos 2\pi \frac{t_1}{\tau_1})} + 0.276\sqrt{2(1 - \cos 5.236\pi \frac{t_1}{\tau_1})}} \quad (28)$$

식 (27)의 분자와 분모에 하중작용시간 t_1 을 곱하여 이상임펄스 I_0 에 의한 임계변위인 식 (22)와 등치시키면 하층 손상곡선의 수평축 값을 아래와 같이 구할 수 있다

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_B = \frac{3.236\pi \frac{t_1}{\tau_1}}{0.724\sqrt{2(1 - \cos 2\pi \frac{t_1}{\tau_1})} + 0.276\sqrt{2(1 - \cos 5.236\pi \frac{t_1}{\tau_1})}} \quad (29)$$

Fig 3에는 사각형 형태의 충격 하중이 하층에 작용할 때 각층의 안전성을 검토할 수 있는 손상곡선

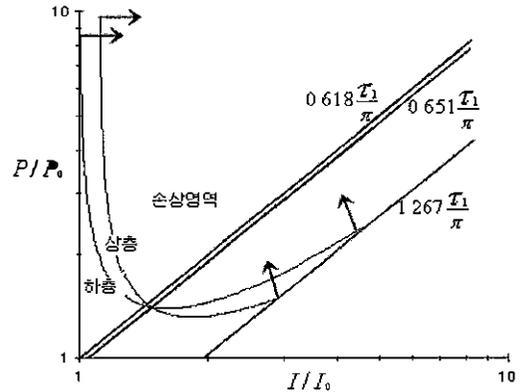


Fig 3 손상곡선

이 나타나 있다 Fig. 3에 작성된 손상 곡선들은 임계변위를 발생시키는 하중들의 임펄스 비와 하중최대치 비가 로그 스케일로 도시되어 있으며, 그림에 나타난 단위기울기를 갖는 직선들의 기울기는 아래와 같다

$$\frac{\log \frac{P}{P_0} - \log \frac{P_1}{P_0}}{\log \frac{I}{I_0} - \log \frac{I_1}{I_0}} = 1$$

여기서 P_1, I_1 은 단위 기울기를 갖는 직선상에 위치한 사각형하중의 크기와 임펄스 값이다 위의 식은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{I}{P} = \frac{I_1}{P_1} \quad (30)$$

식 (30)에서 I/P 값은 사각형 형태 하중의 하중작용시간이다 따라서 단위 기울기를 갖는 동일 직선상에 위치한 하중들은 동일한 하중작용시간을 갖으며 그 중 원점을 통과하는 직선의 I/P 값은 아래와 같다

$$\frac{I}{P} = \frac{I_1}{P_1} = \frac{I_0}{P_0} \quad (31)$$

다른 하중들의 하중작용시간은 식 (30)을 아래와 같이 변환시키어 구할 수 있다

$$\frac{I}{P} = \frac{I_1/I_0}{P_1/P_0} \frac{I_0}{P_0} = \frac{I_1/I_0}{P_1/P_0} \frac{\tau_1}{\pi} \quad (32)$$

즉, 충격하중의 하중작용시간은 임계변위를 발생시키는 이상임펄스에 대한 임펄스 비와 계단하중에 대한 하중최대치 비를 구하여 식 (32)에 대입하면 구할 수 있다

Fig 3에는 상층의 손상곡선과 하층의 손상곡선의 교차점과 교차점을 통과하는 직선이 나타나 있으며 교차점을 통과하는 직선을 중심으로 손상영역의 우측에 위치한 하중에 의해서는 하층에 손상이 발생되나, 좌측에 위치한 하중에 의해서는 상층에 손상이 발생된다

또한, Fig 3에는 손상곡선의 그래디언트(gradient)가 화살표로 표시되어 있으며, 이들 화살표의 방향은 효과적으로 손상을 일으키는 방향을 의미한다 따라서, 구조물의 안전성은 하중의 작용시간이 증가하면 하중최대치가 주요변수가 되나 감소하면 임펄스가 주요변수가 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 상층충격에 의한 각 층의 안전성도 검토하였으나, 검토결과 상층 충격으로 인한 손상은 하중특성에 관계없이 하층에서 발생되었다

6 결론

구부적으로 작용하는 충격하중에 대한 다 자유도 구조물의 안전성을 파악하기 위한 방법으로, 2층 전단건물의 하층에 작용하는 충격하중에 대한 전단건물 각층의 손상곡선을 작성하였으며, 작성된 손상곡선은 하층의 동적 특성과 구조물의 동적 특성이 함께 고려된 방법으로 구조물의 안전성을 일괄적으로 파악할 수 있는 방법이다

하층 충격에 대한 손상곡선 작성결과 충격하중의 하중작용시간이 감소하면 임펄스가 그리고 충격하중의 하중작용시간이 증가하면 하중의 최대치가 구조물의 안전에 주요변수가 되는 것을 파악하였다

상층 충격에 의한 손상은 하중특성에 관계없이 하층에서 발생되었으나, 하층 충격에 의한 손상은 충격하중의 특성에 따라 손상부위가 변화하였다 하중작용시간이 상대적으로 긴 충격하중에 대해서는 하층에 손상이 발생되었으나 반대인 경우에는 상층에 손상이 발생되었다 또한 하층충격에 대해 상층은 하중의 최대치에 대해 그리고 하층은 하중의 임펄스에 대하여 민감하게 반응하였다

하층 충격에 의한 손상부위가 충격하중의 특성에 따라 변화하는 이유는 상층의 관성력 때문이다. 상층의 관성력을 극복할 충분한 하중작용시간을 갖는 충격하중에 대해서는 하층의 변위가 상층의 상대변위보다 크게 발생하기 때문에 하층에 손상이 발생되나, 상층의 관성력을 극복하기 이전에 종료하는 충격하중에 대해서는 상층의 상대변위가 하층의 변위보다 크게 발생하기 때문에 상층에 손상이 발생된다.

감사의 글

이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음

참고문헌

- 1 Dorf, Richard C , Bishop, Robert H . Modern Control Systems, 8th edition, 1998
- 2 Floience, A L , Critical Loads for Reinforced Concrete Bunkers, Final Report to DNA, Contract No DNA 001-77-C-0181, SRI International, Nov 1987
- 3 Olson, M D , Nurick, G N and Frogan, J R , Deformation and Rupture of Blast Loaded Square Plates-Prediction and Experiments Int J Impact Eng 1993
- 4 Phillips, Charles L , Parr M , Signals, Systems, and Transformations, Prentice Hall, 1995
- 5 Shen, W Q and Jones, N , Dynamic Response and Failure of Fully Clamped Circular Plates under Impulsive Loading Int J Impact Eng 132, 1993, pp 259~291

6 Watson AJ, Hobbs B, Wright SJ Scaling Explosive Damage to Reinforced Concrete Beams and Slabs, Proceedings of the First International Conference on Structures under Shock and Impact, 1989 July . Cambridge, MA, USA pp 15~28

7 Wees, Rolf MM . Peters, Dirk-Jan, Accuracy and Range of Applicability of the Single-Degree-of-Freedom Method Proceedings of the Seventh International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, 1995 April 24-28 . Mannheim, Germany pp 371~380

(접수일자 · 2004년 9월 5일) (금행)