

모드유연도 행렬 변위를 이용한 전단빌딩의 정량적 손상평가 방법

Damage quantification of shear buildings using deflections obtained by modal flexibility

성 승 훈* · 구 기 영*** · 정 형 조**

Sung, Seung-Hun · Koo, Ki-Young · Jung, Hyung-Jo

요 약

본 논문에서는 상사진동에서의 응답을 통해 구성된 모드유연도 행렬에 의해 추정되는 변위/변형을 이용해 전단빌딩의 손상을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 전단빌딩의 손발생 후의 층간변위와 손상발생 전·후의 층간변위 차이인 Damage-induced inter-story deflection (DI-ID)의 관계를 이용해 손상을 정량적으로 평가하는 방법이다. 구조물이 양전단력만을 발생시킴으로써 층간변위를 분명히 파악할 수 있도록 하는 양전단력 탐색하중(Positive Shear Inspection Load)을 통해 DI-ID를 산정한다. 제안된 방법의 검증을 위해 5층의 전단빌딩 축소모형을 대상구조물로 선정했으며, 단일손상과 다중손상의 모사를 위해 1층과 3층의 휨강성을 각각 10% 씩 저감시켰다. Static test와 modal test를 통해 각각의 결과를 비교하는 방법으로 제안된 방법의 성능검증을 수행했으며, 축소모형실험 결과, 두 실험간 평균오차 1% 이내로 정확도를 검증했다.

keywords : 구조물 건전성 모니터링, 전단빌딩, 모드유연도, damage quantification

1. 서 론

구조물의 건전도 모니터링은 센서로부터 측정된 구조물의 응답 신호를 분석하여 건전도를 평가하는 기술이다. 지난 수십 년간 진동 기반 구조물의 건전도 모니터링에 대한 연구는 활발히 진행됐으며, 이는 고유진동수, 모드형상, 모드형상 곡률, 모드유연도 등을 활용한다. 하지만 토목 분야에서의 구조물 건전도 모니터링에 대한 연구는 대부분 교량에 집중되어 있으며, 빌딩 구조물에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 모드 유연도 행렬 기반 변위를 이용하여 전단빌딩의 정량적 손상평가를 수행하는 방법을 제안한다. 기존에 연구되었던 정량적 손상 평가 방법은 다양한 설계 변수의 최적화 기법을 활용한 모델 업데이트를 통해 수행되었다. 그러나 제안된 방법은 오직 손상 파라미터만을 활용하여 정량적 손상 평가를 수행한다는 점에서 기존 방법에 비해 간편하며 효율적인 방법이다. 본 연구에서는 축소모형실험을 통해 제안된 전단빌딩의 정량적 손상평가 방법의 성능검증을 수행했다.

* 학생회원 · KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 sshgns@kaist.ac.kr

** Dept. of Civil and Structural Engineering University of Sheffield 박사후연구원 k.koo@sheffield.ac.uk

*** 정회원 · KAIST 건설 및 환경공학과 부교수 hjung@kaist.ac.kr

2. 이론적 배경

2.1. 손상유발 변위의 일반식

손상은 구조물의 강성행렬(K_0)과 변위(u_0)에 영향을 주며, 손상에 의한 구조물의 강성변화와 변위변화는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = (K_0 - \Delta K)(u_0 + \Delta u) \quad (1)$$

식(1)에서 손상등가 하중은 식(2)로 표현되며, 식(2)를 통해 알 수 있듯 손상등가하중은 오직 손상 발생구역에 추가적인 변위를 유발하는 하중이다.

$$\Delta F = \Delta K u_0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ \alpha_e f^e \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $\Delta K = \text{diag}(0, \alpha_e k^e, 0)$; α_e ($0 < \alpha_e < 1$)는 손상정도, k_e 는 손상 구역에서의 손상 전에 표현된 요소강성행렬, $f_e = k^e u^e = \{V, M - V, M\}$ 는 잔류응력이다.

즉, 식(1)과 식(2)를 통해 최종적으로 손상유발변위는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta u = (K_0 - \Delta K)^{-1} (\Delta K u_0) \quad (3)$$

2.2. 양전단력 탐색하중

DI-ID는 손상 시, 외력(F)에 의해 유발되는 잔류응력(f_e)에 의해 발생한다. 그러나 만약, i 번째 상층부의 외력의 합이 '0' 이 된다면, i 번째의 잔류응력도 '0' 이 되기 때문에 손상이 발생하더라도 DI-ID는 나타나지 않는다. 본 연구에서는 모든 층에서 양의 전단력이 발생하도록 하는 양전단력 탐색하중을 활용했으며, 이러한 하중 하에서는 모든 층에서 양의 전단력이 발생하기 때문에 DI-ID를 명확히 확인할 수 있다[1].

2.3. 모드유연도 행렬 기반 변위를 이용한 정량적 손상평가

식(2)에서 α_e 는 구조물의 강성변화 비율, 즉, 손상정도를 의미하며, 이는 식(2)와 (3)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta u^{IS} = \frac{1}{(1 - \alpha_e)k_0} \times \alpha_e V = \frac{\alpha_e}{(1 - \alpha_e)} \times u_0^{IS} \quad (4)$$

$$\alpha_e = \frac{\Delta u^{IS}}{u_d^{IS}}$$

따라서 구조물에 발생한 손상정도는 손상 발생 후의 모드유연도 행렬 기반 변위와 손상유발 변위의 관계를 통해 얻어진다.

3. 실험 결과

제안된 방법의 성능검증을 수행하기 위해서 5층의 전단빌딩에 대한 축소모형실험을 수행하였다. 실험에서 사용된 전단빌딩 구조물의 제원은 표 1과 같으며, 표 2는 손상 시나리오이다. 계측된 데이터의 모드해석을 통해 얻어진 손상 전·후의 모드유연도 기반 변위를 이용하여 정량적 손상평가를 수행하였고, Static test 에 의한 결과와의 비교를 통해 제안된 방법의 성능검증을 수행했다. 이에 대한 실험 결과는 그림 1과 같다.

표 1 구조물 제원

Parameters	Value
Mass (m)	16.09 kg
Damping (c)	3.27 Ns/m
Mass density (ρ)	7850 kg/m ³
Poisson's ratio (ν)	0.28
Elasticity modulus (E)	200 GPa
Bending stiffness (EI)	20 Nm ²
Length (L)	34.3 cm

표 2 손상 시나리오

Case	Damage Location	Reduction of EI
Intact	None	None
Damage 1	1 st Floor	10%
Damage 2	1 st Floor and 3 rd Floor	10%

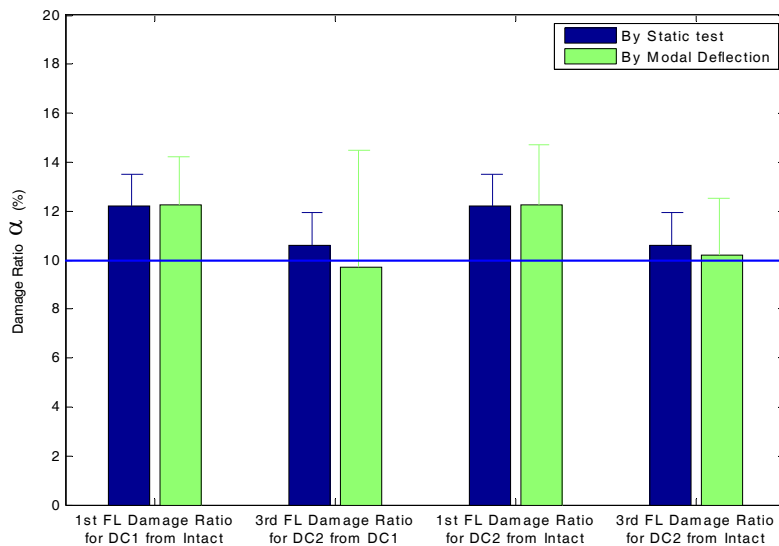


그림 1. Static test 와 modal test 에 의한 손상정도 평가 비교 [2]

그림 1에서와 같이 제안된 방법은 축소모형실험 결과, 단일손상과 다중손상 모두에서 두 실험간 평균오차 1% 이내로 정확도를 검증했다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원(과제번호 2008-F-044-01)으로 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

참고문헌

- K.Y Koo, S.H Sung, J.W Park and H.J Jung.**(2010) "Damage Detection of Shear Buildings Using Deflections Obtained by Modal Flexibility," Smart Materials and Structures, 115026
- K.Y Koo, S.H Sung, and H.J Jung.**(2011) "Damage quantification of Shear Buildings Using Deflections Obtained by Modal Flexibility," Smart Materials and Structures, 045010