

기설구조물의 손상도 및 내진능력 평가방법

Damage Assessment and Aseismic Capacity Evaluation of Existing Structures

윤 정 방* 송 종 겐** 김 유 진***
Yun, Chung-Bang Song, Jong-Keol Kim, Yoo-Jin

요 지

본 연구에서는 기설구조물에 대한 손상도 추정기법과 내진능력평가 방법에 대하여 연구하였다. 구조물의 손상도를 추정하는 방법으로는 소수의 계측 데이터를 이용한 모드섭동법(inverse modal perturbation)을 이용하였다. 구조물의 손상은 강성행렬의 감소로 표현하여, 각 요소행렬에 대한 손상을 손상지수를 사용하여 나타내었다. 구조적 손상과 이에 기인한 고유진동 특성의 변화량과의 관계를 섭동방정식으로부터 구한 후, 이로부터 손상지수와 고유진동 특성의 변화량과의 관계를 유도하였다. 따라서 손상 전과 후에서 구조물의 고유진동수와 모드형상을 측정하여 섭동식의 해를 구함으로써 구조물의 강성행렬의 감소로 나타나는 구조물의 손상도를 추정하게 된다. 손상도 추정에 의해 평가된 강성의 변화량에 기인한 손상 후의 기설구조물의 지진응답, 내진능력과 지진손상도의 평가를 손상전과 비교하였다. 내진능력은 구조부재에서 회전연성도 능력의 경험식을 이용하여 평가하였고, 지진손상도의 평가는 가장 많이 사용되는 방법인 Park & Ang 방법을 사용하였다. 예제해석은 다른 지진하중을 받는 2층과 8층의 예제구조물에 대해서 수행하였다.

핵심용어 : 손상도 추정, 내진능력, 모드섭동법, 지진응답, 지진 손상도 평가

Abstract

The content of this paper consists of two related subjects. One is the assessment of damages in the existing structure and the other is the evaluation of seismic capacity of the structure with damage. A method is presented for damage assessment of existing structures using the modal data measured at limited points by the inverse modal perturbation technique. For efficient damage assessment, the number of the unknown probable damaged members is reduced for each damage identification by grouping the members in the large structure. The aseismic capacity is evaluated for the structure using the results of damage assessment. An example analysis is carried out for existing structures subjected to different earthquake excitations.

Keywords : system identification, damage assessment, aseismic capacity, inverse modal perturbation, seismic response

* 정희원·한국과학기술원 토목공학과, 교수
** 정희원·한국과학기술원 토목공학과, 연수연구원
*** 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정

* 이 논문에 대한 토론을 1998년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

세계적으로 최근에 발생한 강한 지진인 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), Hyogo-Ken Nanbu 지진(1995) 등으로 인하여 많은 인명손실과 경제적 손실이 발생하였다. 이러한 배경으로부터 기설 구조물에 대한 손상도 추정 및 내진능력평가 방법에 관한 연구에 관심이 증가되고 있는 현실이다. 이제까지 우리나라는 지진에 대하여 안전지대로 인식되어 왔지만, 영월 지진(1996), 경주지진(1997) 등 규모는 작지만 지속적인 지진의 발생으로 인하여 지진으로부터 안전지대가 아닌가 하는 우려가 대두되고 있는 시점에서 본 연구는 기설구조물의 보수, 보강에 효과적으로 활용될 수 있으리라 판단된다. 본 연구는 두 단계로 구성되어 있으며, 첫번째 단계는 기설구조물의 손상도 추정에 관한 연구이며, 두번째 단계는 첫번째 단계에서 구한 손상도의 양인 강성의 저하정도를 반영하여 기설구조물의 손상 전과 손상후에 지진응답 및 내진능력의 평가에 관한 연구이다.

첫번째 단계인 구조물의 손상도를 추정하기 위해서는 기설구조물의 진동특성을 계측으로부터 구한 뒤 진동특성의 변화를 이용하여 손상위치와 손상정도를 추정하는 방법을 사용하였다. 실제 구조물에서 계측을 수행할 경우 구조물의 모든 자유도에 대한 계측자료를 얻는 것은 불가능하기 때문에 소수의 계측 자료를 이용하여 구조물의 손상을 추정할 수 있는 모드섭동법을 이용하였다. 구조물의 손상은 강성행렬의 감소로 표현하였으며, 각 요소행렬에 대한 손상을 손상지수를 사용하여 나타내었다. 구조적 손상과 이에 기인한 고유진동 특성의 변화량과의 관계를 섭동방정식으로부터 구한 후, 이로부터 손상지수와 고유진동 특성의 변화량과의 관계를 유도하였다. 따라서 손상 전과 후에서 구조물의 고유진동수와 모드형상을 측정하여 섭동식의 해를 구함으로써 구조물의 강성행렬의 감소로 나타나는 구조물의 손상도를 추정하게 된다. 본 연구에서는 구조물의 손상도 추정에 사용될 2차 섭동식을 구성하

고, 이것을 반복적인 절차를 거쳐 해를 구하는 방법에 대하여 연구하였다. 즉, 처음에 1차 섭동식을 사용하여 근사적인 강성행렬의 변화량을 구하고, 이 강성행렬의 변화량에 대한 모드형상을 다시 계산하여 2차 섭동식을 구성한다. 구성된 2차 섭동식의 해를 구함으로써 더 정확한 강성행렬의 변화량을 구하게 되며, 위의 과정을 강성행렬의 변화량이 수렴할 때까지 반복적으로 계속한다. 대형구조물의 경우에는 부재의 수가 많아서 전체 구조에 대한 손상도 추정이 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 구조물 전체를 몇 개의 그룹으로 나누고, 각각의 그룹에 해당하는 부재에 대해서만 손상도를 추정한 뒤 반복적인 절차에 의해서 전체 구조물의 손상도를 추정하는 방법을 제안하였다.

두번째 단계인 기설구조물의 내진능력 평가는 지진하중에 대하여 손상 전과 손상 후의 지진응답, 회전연성도 능력과 지진손상도를 비교하여 수행하였다. 손상 후의 구조물의 내진능력 평가는 첫번째 단계에서 구한 강성의 저하정도를 반영하여 Daali와 Korol⁶⁾이 제안한 경험식을 사용하여 회전연성도 능력을 평가하였다. 지진응답의 평가에서는 구조부재의 손상정도가 지진응답에 미치는 영향을 분석하기 위하여 손상 전의 경우와 손상 후의 경우에 대하여 상층부의 변위, 밀면 전단력과 지진에너지 항들을 비교하였다. 지진손상도 해석에서는 Park & Ang 방법을 사용하였다. 이 방법은 구조물의 내진능력과 지진요구도의 비교에 의하여 지진손상도를 평가하는 방법이다. 지진손상도 해석을 위하여 필요한 각 구조부재의 지진응답인 회전연성요구도 및 비탄성 변형에너지는 해석적으로 평가가 가능하지만, 구조부재의 내진능력인 회전연성도능력은 해석적으로는 평가가 불가능하고 실험적으로만 평가 가능하기 때문에 경험식⁶⁾을 사용하였다. 이 경험식은 I형 단면의 강구조 부재에만 적용이 가능하고 모든 형상의 부재단면에 대한 연성도 능력을 평가하기에는 아직 부족하지만 이제까지 연성도 능력의 평가에 관한 연구가 없었던 점에 비하면, 근사적으로 연성도 능력을 평가하는 데 유용하게

사용될 수 있다. 즉, 지진요구도인 회전연성요구도와 비탄성 변형에너지와 내진능력인 회전연성도 능력의 평가결과들을 Park & Ang 방법에 적용하여 지진손상도 해석을 수행하여 구조부재의 손상정도가 지진손상도에 미치는 영향을 El Centro 지진과 Mexico 지진에 대하여 분석하였다.

2. 고유진동특성 추정에 의한 손상도 평가 기법

2.1 모드섭동법을 이용한 구조물의 손상도 추정 기법

손상된 구조계의 고유치 식은 손상전의 것과 유사하게 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K'\Phi' = M'\Phi'\Lambda' \quad (1)$$

여기서 K' , M' , Λ' , Φ' 은 각각 손상후의 강성행렬, 질량행렬, 고유치 및 모드형상행렬을 나타낸다.

또한 제 i -번째 모드형상의 변화량 $\Delta\phi_i$ 는 손상전 구조계의 모드형상의 선형조합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \phi_j \quad (2)$$

여기서 C_{ij} 는 손상후 i -번째 모드에 대한 손상전 j -번째 모드의 기여도이다. 따라서 손상후의 구조계의 모드형상행렬은 초기의 모드형상행렬과 행렬 C 로 다음과 같이 간단히 표현된다. 구조물의 손상이 작으면, C_{ij} 의 값은 작은 값을 갖게 된다.

$$\Phi' = \Phi(I + C^T) \quad (3)$$

따라서, 식(1)은 손상에 의한 구조계의 변화량 Δ 와 식(3)을 이용하면 다음과 같이 변형된다.

$$(K + \Delta K)\Phi(I + C^T) = (M + \Delta M)\Phi(I + C^T)(\Lambda + \Delta\Lambda) \quad (4)$$

구조적인 손상의 형태가 재료의 노후화나 혹은 균열발생에 의한 것이 대부분이므로 손상전후에 질량의 변화는 없는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 식(4)에 Φ^T 를 선승하고, $\Delta M = 0$ 인 조건을 적용하면 다음과 같은 2차-섭동식을 얻을 수 있다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi' = [\mu_\Lambda](C^T \Lambda' - \Lambda C^T + \Delta\Lambda) \quad (5)$$

여기서 $[\mu_\Lambda]$ 은 일반질량행렬(Generalized Mass Matrix)로서 $[\mu_\Lambda] = \Phi^T M \Phi$ 이다.

구조물의 강성변화량과 이로 인한 동특성의 변화량인 $\Delta\Lambda$ 와 C 행렬의 값이 작아서, 이들 간의 2차 이상의 항들을 무시할 수 있다면 식(5)는 다음과 같이 1차 섭동식이 된다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi = [\mu_\Lambda](C^T \Lambda - \Lambda C^T + \Delta\Lambda) \quad (6)$$

1차와 2차 섭동식 사이의 차이는 식(5)의 좌변에서 Φ' 이 Φ 로, 우변에 Λ' 이 Λ 로 각각 바뀐 것이다. 1차 섭동식은 좌변에는 강성행렬의 변화량만으로 구성되어 있고, 식의 우변에는 고유진동수와 모드형상의 변화량만으로 구성되어 있어, 손상전후의 구조물의 동특성의 변화를 측정하여 식(6)의 해를 구하면 강성행렬의 변화량, 즉 구조물의 손상도를 알 수 있게 된다. 그러나 1차 섭동식은 강성변화량과 동특성의 변화량이 작은 경우에만 적용할 수 있는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 일반적인 2차 섭동식으로 구조물의 손상도를 구하는 방법에 대하여 연구하였다. 식(5)의 2차 섭동식은 좌변에 있는 손상후의 모드형상을 구조물의 전 자유도에 대해 완전하게 측정할 수 없기 때문에 강성행렬의 변화량을 바로 구할 수는 없다. 그래서 반복적인 절차를 거쳐 해를 구하는 방법을 고안하였다. 즉, 먼저 1차 섭동식을 이용하여 근사적으로 강성행렬의 변화량을 구한다. 다음에 이 강성행렬의 변화에 대한 새로운 모드형상을 다시 계산하고, 이 모드형상을 2차 섭동식에 사용하여 해를 구하게 된다. 구해진 해는 식에 사용한 모드형상이 손상후의 모드형상을 정확하게 나타내지 못하기 때문에

정확한 해는 아니지만, 1차 섭동식에 의하여 구한 결과보다는 정확하다고 할 수 있다. 따라서 모드형상을 새로 계산하고, 이것을 2차 섭동식에 사용하여 강성행렬의 변화량을 다시 구하는 과정을 반복하여, 강성행렬의 변화량이 수렴할 때까지 계속하면 정확한 해에 도달하게 된다.

섭동식의 해는 다음의 식 (7) 과 같이 고유진동수의 변화량에 대한 관계식의 제공한 오차를 목적함수로 하고, 모드형상과 관련된 식을 구속 조건식으로 하여 Quadratic Programming 기법을 사용하여 구하였다.

$$\min J = \sum_{k=1}^n \left\{ w_k \left(\sum_{e=1}^l \phi_k^T K_e \phi_k' \alpha_e - \mu_k (1 + C_{kk}) \Delta \lambda_k \right)^2 \right. \\ \left. | \phi'_{k,measured} - \phi_k'(\alpha_e) | \leq \epsilon_k \right. \quad (7)$$

2.2 예제구조물의 손상도 추정

모드섭동법에 의한 손상도 추정기법의 검증을 위하여 두 가지 예제구조물(SCWB2, SCWB8)을 대상으로 하여 수치해석을 수행하였다.

2.2.1 예제구조물SCWB2에 대한 손상도 추정

본 예제에서는 그림 1과 같은 예제구조물을 대상으로 하여 손상도 추정기법을 검증하였다. 설계된 예제구조물은 강기둥-약보(strong-column

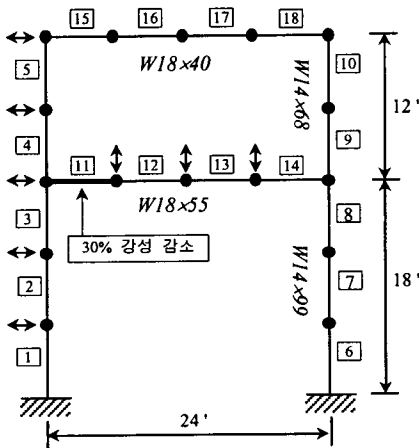
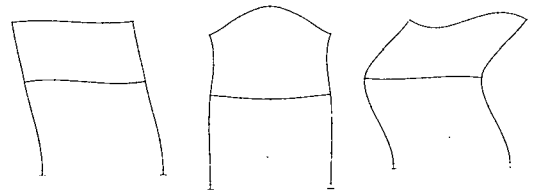


그림 1 예제구조물 SCWB2의 계측위치와 손상부재

weak-beam)의 설계개념에 따른 2층 구조물이고 손상도 추정을 위하여 예제구조물을 프레임요소를 사용한 유한요소모형으로 모형화 하였다. 탄성계수는 29,000ksi로 하였으며 각 층의 집중질량은 모든 층에 대하여 0.15kips·sec²/in로 가정하였다. 그 결과 SCWB2에 대한 고유진동주기는 0.625초로 계산되었고 모드형상은 그림 2와 같다.

손상도 추정기법을 검증하기 위해 예제구조물에 인위적으로 손상이 발생했다고 가정하고, 손상 후 구조물의 계측자료를 이용하여 모드섭동법을 적용하였다. 효과적인 손상 추정을 위해 모드변형에너지(MSE)³⁾를 이용하여 손상부재를 선택하였다. 어떤 요소의 모드변형에너지(MSE)가 크면 그 요소의 손상이 구조물의 모드 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 우선 기둥은 손상이 잘 발생하지 않기 때문에 손상시나리오에서 제외하였고, 첫번째 모드에 대한 모드변형에너지가 큰 요소 중에서 11번 요소를 선택하여 30%의 강성 감소를 가정하였다. SCWB2의 각 부재에 대한 모드변형에너지는 그림 3과 같다. 또한, 실제 동



(a) 첫번째 모드형상 (b) 두번째 모드형상 (c) 세번째 모드형상

그림 2 예제구조물 SCWB2의 모드형상

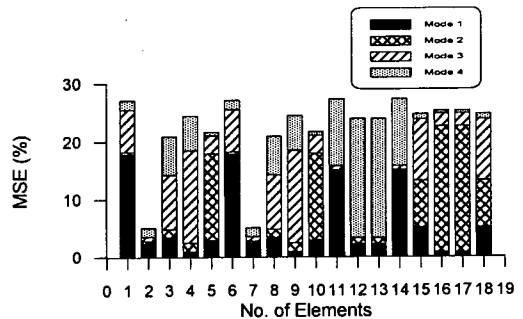


그림 3 예제구조물 SCWB2의 모드변형에너지

적 실험에서는 구조물의 모든 자유도를 계측하는 것은 불가능하기 때문에 제한된 절점에서의 계측만이 가능하다. 따라서 예제구조물에서는 그림 1에서 나타난 위치에 대해서만 계측자료를 얻을 수 있다고 가정하였다.

구조물의 손상은 강성과 질량이 동시에 변하는 것이 보통이지만 대부분의 경우 질량의 변화는 미소하다고 가정하면 손상 후의 구조물은 강성의 감소로 인하여 고유진동수가 감소하게 된다. 11번 요소는 첫번째 모드와 네번째 모드에 대한 모드변형에너지가 크기 때문에 첫번째와 네번째 고유진동수가 많이 감소하였다. SCWB2에서 손상 전과 손상 후의 고유진동수의 변화를 표 1에 나타내었다.

손상도 추정을 위해 모드섭동법을 사용하였다. 즉, 손상 후 구조물의 모든 요소의 손상지수를 미지수로 하고, 모드섭동법에 의해 손상지수를 추정하였다. 모드섭동법에서는 손상 후 구조물의 고유진동수 5개와 모두 8개의 절점에 대한 모드형상 3개를 계측자료로 사용 하였다. 또한 최적화에 의해 해를 구할 때, 내부적인 반복절차 뿐만 아니라 전체적인 반복절차가 필요한데, SCWB2의 손상지수를 구하는 데는 2회의 전체적인 반복절차와 각각 8회와 6회의 내부적인 반복절차를 거치는 동안 해가 수렴하였다. 그 결과 표 2에 나타난 것처럼 손상지수를 구하였다. 손상지수의 정확해는 11번 요소에서만 -0.3이 나오고 그 이외의 요소에서는 모두 0이 나와야 하는데, 최적화 과정에서 생긴 오차의 영향으로 다른 요소에서도 미소한 손상지수가 추정되었으나, 그 크기가 11번 요소의 값과 상대적으로 비교해 볼

표 1 예제구조물 SCWB2의 손상 전후의 고유진동수

모드 번호	고유진동수 (Hz)	
	손상 전	손상 후
1	1.601	1.558
2	5.755	5.751
3	5.992	5.984
4	7.529	7.366
5	16.694	16.686

표 2 예제구조물 SCWB2에서 추정된 손상지수

요소번호	손상지수 (α)	
	정확해	추정된 값
1	0.000	0.000
2	0.000	0.001
3	0.000	0.001
4	0.000	0.002
5	0.000	0.001
6	0.000	0.000
7	0.000	0.000
8	0.000	0.001
9	0.000	0.001
10	0.000	0.000
11	0.000	0.000
12	0.000	0.020
13	0.000	-0.018
14	0.000	0.000
15	0.000	0.000
16	0.000	0.000
17	0.000	0.001
18	0.000	0.000

때 매우 작기 때문에 결과는 거의 정확하다고 할 수 있다.

제한된 모드섭동법에 의해서 손상도 추정을 수행한 결과, 제한된 절점에서의 계측자료를 이용한 손상 추정이 가능하였고, 추정된 손상지수는 손상부재의 위치를 파악하는데 매우 유용하고 손상 정도를 추정하는 데 효과적임을 알 수 있었다.

2.2.2 예제구조물-SCWB8에 대한 손상도 추정

본 예제에서는 그림 4와 표 3에 나타난 예제구조물을 대상으로 손상도 추정을 수행하였다. 설계된 예제구조물은 강기둥-약보(SCWB)의 설계 개념에 따른 8층 구조물이고 손상도 추정을 위해 예제 구조물을 프레임 요소를 사용한 유한요소모형으로 모형화 하였다. 탄성계수는 29,000ksi로 하였고 각 층의 집중질량은 0.45kips·sec²/in로 하여 고유진동주기가 1.684초로 계산되었으며 모드형상은 그림 7과 같다. 구조물의 손상은 46번 요소와 56번 요소의 강성이 동시에 각각 30%,

표 3 예제구조물 SCWB8에 사용된 단면

Member ID.	SCWB8
(a) Interior Columns	
C4	W24×55
C3	W24×84
C2	W24×94
C1	W24×131
(b) Exterior Columns	
C4	W14×48
C3	W14×74
C2	W14×90
C1	W14×99
(c) Girders	
B4	W18×40
B3	W21×50
B2	W24×55
B1	W24×68

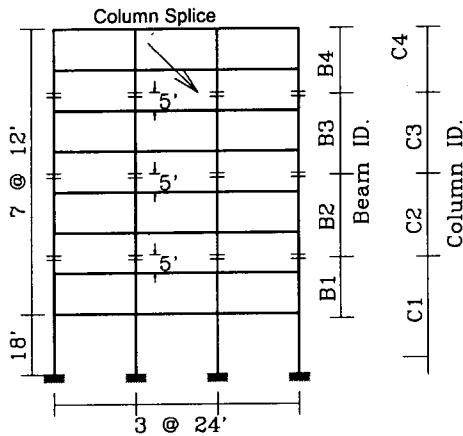


그림 4 예제구조물 SCWB8

50% 감소했다고 가정하였다. 실제로 동적 구조 실험을 수행할 경우 모든 자유도에서 계측할 수 없기 때문에 제한된 절점에서의 계측 자료를 이용하였다. 손상요소의 위치와 계측점을 그림 5에 나타내었다.

손상도 추정을 위하여, 계측된 고유진동수 4개와 8개의 절점에서 계측한 모드형상 3개를 사용한 모드섭동법을 이용하였다. 본 예제구조물의 경우는

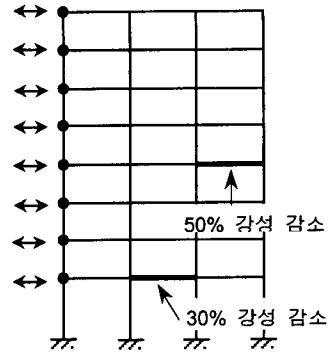


그림 5 예제구조물 SCWB8의 계측 위치와 손상부재

부재의 수가 많기 때문에 손상도 추정을 보다 효과적으로 수행하기 위하여 그림 6과 같이 전체 구조물을 3개의 그룹으로 나누고 각 그룹에 속한 요소의 손상지수만 미지수로 하여 추정한 후, 반복절차를 통해 전체 구조의 손상지수를 구하였다.

본 예제해석의 목적은 손상도 추정기법을 검증하기 위한 것이기 때문에 실제로 손상된 부재가 속하지 않은 그룹 3의 부재들은 손상도 추정 과정에서 제외하고 나머지 부재들에 대해서만 손상도 추정 기법을 적용하였다. 즉, 그룹 3에 대해서는 손상지수를 모두 0으로 가정하고 반복절차에서 제외하였고 그룹 1과 그룹 2에 대한 반복절차를 통하여 손상지수를 추정하였다. 손상도 추정과정은 다음과 같다. 먼저 1단계에서는 그룹 2에 속

- Group 1: 1~3 층의 보요소
- Group 2: 4~8 층의 보요소
- - - Group 3: 모든 기둥 요소

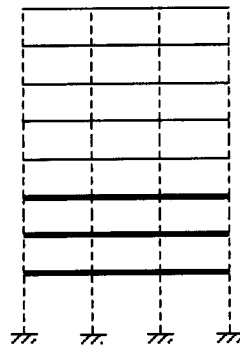


그림 6 손상지수 추정을 위해 분류한 그룹 (SCWB8)

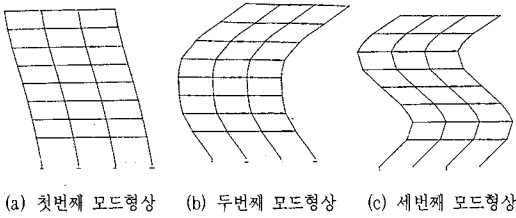


그림 7 SCWB8의 모드형상

표 4 예제구조물 SCWB8의 손상 전후의 고유진동수

모드 번호	고유진동수 (Hz)	
	손상 전	손상 후
1	0.5937	0.5826
2	1.6480	1.6341
3	2.9385	2.8921
4	4.5011	4.4974

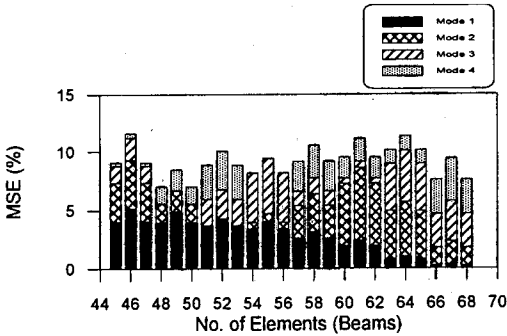


그림 8 예제구조물 SCWB8의 모드변형에너지

표 5 각 단계에 따른 손상지수의 변화(예제구조물 SCWB8)

	요소 번호	추정된 손상지수			
		1단계	3단계	5단계	7단계
그룹1	45	0.045	0.072	0.077	0.068
	47	0.045	0.072	0.080	0.073
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		2단계	4단계	6단계	
그룹2	54	0.021	0.023	0.000	
	55	0.021	0.023	0.000	
	57	0.021	0.023	0.000	
	⋮	⋮	⋮	⋮	

한 요소의 손상지수를 모두 0인 것으로 가정하고, 그룹 1의 9개 요소에 대해서 손상지수를 추정하였다. 다음으로 2단계에서는 그룹 1은 추정된 손상지수를 적용하고 그룹 2의 15개 요소에 대해서 손상지수를 추정하였다. 이와 같은 단계를 계속 반복하여 최종적인 손상지수를 추정하였다.

본 예제의 경우, 실제로 손상된 요소가 그룹 1과 그룹 2에 동시에 속하였기 때문에 많은 단계를 거치게 되는데 최종적인 손상지수를 구하기 위하여 모두 7단계를 거치면서 총 144회의 내부적인 반복절차를 사용하였다. 즉, 1, 3, 5, 7단계에서는 그룹 1에 속한 요소에 대한 손상지수를 추정하였고 2, 4, 6단계에서는 그룹 2에 속한 요소에 대한 손상지수를 추정하였다. 각 단계를 마칠 때에는 상대적으로 작은 값을 나타내는 손상지수를 0으로 하여 다음 단계에서 해의 수렴을 향상시켰다. 각 단계에 따른 손상지수의 변화는 표 5와 같다.

손상지수의 추정결과, 실제로 손상된 요소의 손상지수가 다른 요소의 손상지수에 비해서 매우

크게 나타났으며 손상정도도 비교적 정확하게 추정되었다. 특히 56번 요소는 강성감소가 50%로 46번 요소의 30% 강성감소에 비해서 그 정도가 심하기 때문에 더 정확한 값을 예측할 수 있었다. 또한 구조전체를 3개의 그룹으로 나누고 여러 단계에 의하여 반복적으로 손상지수를 추정해 나가는 기법을 도입한 결과, 여러 개의 손상요소가 있을 경우에도 매우 효과적으로 손상도 추정을 할 수 있었다.

3. 추정된 강성저하에 근거한 지진응답 및 내진능력 평가

3.1 회전연성도 능력 및 지진손상도 평가법

연성도의 개념은 지진공학에서 주로 사용되는 변수로서 내진능력 평가 및 지진손상도 해석에서도 주된 변수로 사용된다. 구조부재의 회전연성도 능력은 단조증가 하중재하 실험에 의하여 구

조부재의 강도가 급격한 감소 없이 파괴상태에도달할 때의 부재 끝단의 최대회전을 항복회전으로 나누어서 구할 수 있다. 회전연성도 능력의 평가는 구조물의 비탄성 거동이 부재 끝단의 소성힌지에 집중되므로 내진능력 평가에 유용하다. 즉, 구조물의 지진에너지 소산능력을 평가하는데 유용하다. 그러나 해석적인 방법으로는 회전연성도 능력의 평가가 불가능하므로, I형상의 단면을 가진 구조부재에 대한 실험결과들로부터 Daali와 Korol⁶⁾이 제안한 다음과 같은 경험식을 사용한다.

$$\mu_m = 1 - 9.2\lambda + 10.71\lambda^{-0.293} \quad (8)$$

여기서,

$\lambda = \frac{\alpha_l \alpha_w \alpha_t}{30072}$, $\alpha_l = \frac{b}{t\epsilon}$, $\alpha_w = \frac{d}{\omega\epsilon}$, $\alpha_t = \frac{L}{r_v\epsilon}$, $\epsilon = \left(\frac{300}{\sigma_v}\right)^{1/2}$ 이다. λ 는 유효 수평세장비이며, 이는 플랜지, 웹, 부재길이에 대한 세장비의 곱의 형태로 정의된다. b 는 단면 반쪽의 폭이고, t 는 플랜지의 두께, d 는 플랜지와 플랜지 사이의 길이, ω 는 웹의 두께, L 은 실험상에서 최대모멘트를 받는 지점과 가력지점의 거리이므로 실제 구조부재의 길이에 반에 해당하는 값이다. r_v 는 약축에 대한 회전반경이며, σ_v 는 항복응력으로서 단위는 Mpa를 사용한다.

일반적으로 지진손상도 해석법은 구조물의 연성도와 비탄성 거동에 의해 소산시킨 에너지를 주된 손상변수로 사용한다. Park과 Ang^{7), 8)}이 제안한 손상함수는 가장 많이 사용되고 실험결과와도 비교적 잘 일치하므로 본 연구에서는 이 방법을 사용하였다. Park & Ang방법에 의한 지진손상도는 최대변위와 소산된 비탄성 변형에너지의 선형조합에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$D_{PA} = \frac{x_{max}}{x_{u,mon}} + \beta \frac{E_h}{F_y x_{u,mon}} = \frac{\mu + \beta(\mu_e - 1)}{\mu_{u,mon}} \quad (9)$$

$$; \mu_e = \frac{E_h}{F_y x_v} + 1$$

여기서, x_{max} 는 최대변위이고, $x_{u,mon}$ 는 최대변위

의 허용값이다. β 는 구조요소의 성질저하 정도를 나타내는 변수이고, 실험결과⁷⁾에 따르면 β 는 -0.3~1.2의 값이며 평균값은 0.15의 값이다. 본 연구에서 β 는 0.15를 사용한다. E_h 는 비탄성 거동에 의해 소산시킨 에너지이며, F_y 는 항복력이다. μ 는 지진하중에 의한 구조부재 혹은 구조물의 최대변위를 항복변위로 나눈 변위 연성요구도이며, $\mu_{u,mon}$ 는 연성도의 최대 허용값으로 단조증가 하중조건의 실험에 의해 결정된 구조물의 붕괴 상태에서의 최대변위를 항복변위로 나눈 값이다. μ_e 는 비탄성 변형에너지를 연성도의 개념으로 나타낸 이력연성도이고, x_v 는 항복변위이다.

일반적으로 손상지수가 0이면 손상을 입지 않았음을 의미하며 1이면 붕괴상태를 의미한다. 그러나, Park & Ang 방법은 구조물의 최대변위가 탄성범위내에 존재할 때에도 손상지수가 0이 아닌 값을 나타내는 단점이 있다. 또한, 단조증가 하중조건하의 실험에서 붕괴상태에서도 손상지수의 값은 1을 나타내지 않는다. 즉, 이 손상함수는 정규화되지 않은 단점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 구조물의 최대변위가 탄성범위내에 존재할 경우에는 손상지수가 0이라고 가정하여 사용하였다.

3. 2 예제 해석

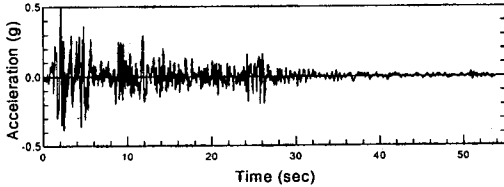
예제해석은 SCWB2의 구조물의 경우에는 1층보의 왼쪽 소성힌지 부분의 강성이 30% 감소한 경우를 고려하였으며, SCWB8의 구조물의 경우에는 1층 가운데 보 부재의 강성이 전체적으로 30% 감소한 경우를 고려하여 손상 전과 손상 후에 대하여 수행하였다.

입력지진으로는 유효최대가속도(EPA)가 0.4 g가 되도록 스케일 조정된 El Centro 와 Mexico 지진을 사용하였다. 여기서 Mexico 지진은 일반적인 지진과는 달리 긴 주기 성분이 많으므로 유효최대가속도의 계산에 1초에서 5초대의 응답스펙트럼을 사용하였다.

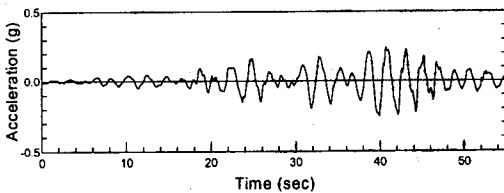
3. 2. 1 지진응답의 비교

지진응답은 구조물의 상층부의 변위, 밀면 전단력과 지진에너지를 손상 전의 구조물과 손상후

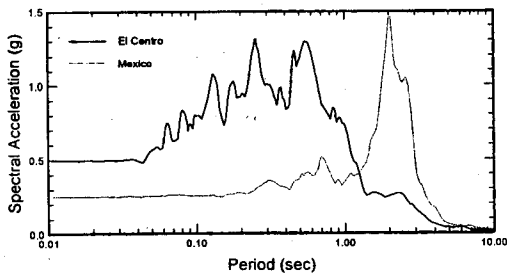
의 구조물에 대하여 비교하였다. 지진에너지는 비탄성 변형에너지^{9)~11)}가 구조물의 지진손상도와 직접적인 관련이 있는 항이므로 이의 결과만 비교하였다. SCWB2와 SCWB8에 대한 지진응답의 비교를 그림 10~11에 나타내었다. Mexico 지진은 긴 주기 성분이 지배적이므로 예제구조물 SCWB2의 경우에는 고유주기가 상대적으로 짧기 때문에 탄성거동만을 하므로, 비탄성 거동을 El Centro 지진에 대한 결과만을 비교하였다. 해석 결과로부터 손상 후의 경우가 손상 전보다 지진응답이 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. SCWB2의 고유주기는 손상 후의 구조물이 손상 전보다 0.01초 증가한 0.64초이다. 그림9의 c)를 통하여 SCWB2의 손상 전과 손상 후의 고유주기



(a) EL Centro 지진 (남북방향 성분, 1940)

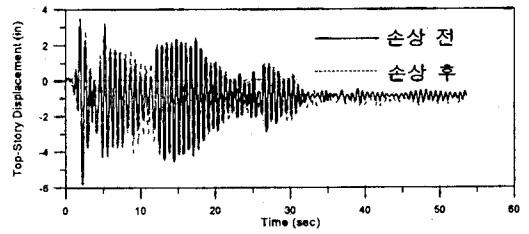


(b) Mexico 지진 (동서방향 성분, 1985)

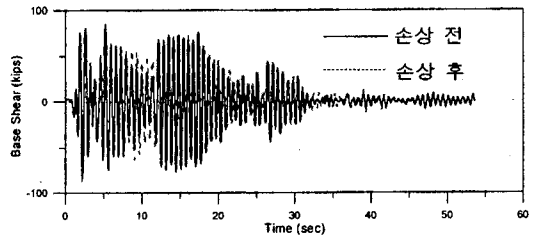


(c) 5% 감쇠계수에 대한 탄성응답스펙트럼

그림 9 입력 지진가속도 (EPA가 0.4g가 되도록 스케일 조정)

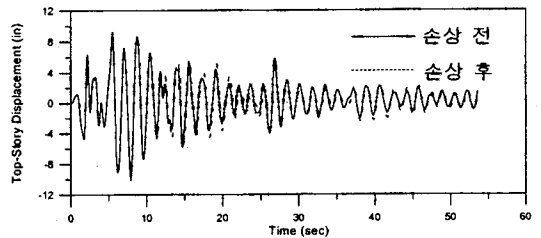


(a) 상층부의 변위

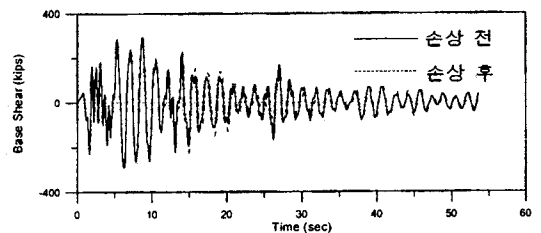


(b) 밑면 전단력

그림 10 SCWB2에 대한 지진응답의 비교(El Centro 지진)



(a) 상층부의 변위



(b) 밑면 전단력

그림 11 SCWB8에 대한 지진응답의 비교(El Centro 지진)

표 6 예제구조물 SCWB8에서 최종적으로 추정된 손상지수

요소 번호	손상지수 (α)		요소 번호	손상지수 (α)	
	정확해	추정된 값		정확해	추정된 값
1~44	0.000	0.000	57	0.000	0.000
45	0.000	0.068	58	0.000	0.000
46	0.300	0.284	59	0.000	0.000
47	0.000	0.073	60	0.000	-0.013
48	0.000	0.000	61	0.000	0.000
49	0.000	-0.085	62	0.000	0.000
50	0.000	-0.051	63	0.000	-0.021
51	0.000	0.000	64	0.000	0.000
52	0.000	0.000	65	0.000	-0.042
53	0.000	0.046	66	0.000	0.000
54	0.000	0.000	67	0.000	0.000
55	0.000	0.000	68	0.000	0.000
56	0.500	0.504			

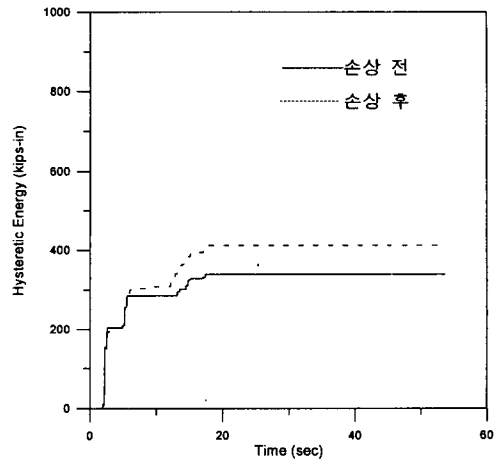
표 7 SCWB2에 대한 손상 전과 손상 후의 구조부재의 회전연성도 능력 (μ_m)

부재 단면	α_f	α_w	α_c	λ	μ_m
W18x40: 2층 보	5.230	44.919	103.507	0.809	4.958
W18x55: 1층 보	5.455	36.281	78.715	0.518	9.219
W18x55: 1층 보(*)	7.794	36.281	78.715	0.749	5.886
W14x68: 2층 기둥	6.362	24.747	26.718	0.140	18.771
W14x99: 1층 기둥	9.364	21.175	17.716	0.117	20.017

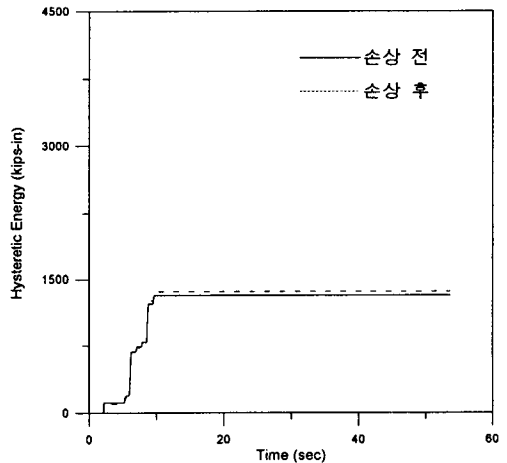
주) (*): 손상에 의해 강성이 30% 감소한 경우

의 차이에 의한 지진응답의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 그러므로 지진응답의 차이는 구조부재의 손상정도가 지배한다고 할 수 있다.

SCWB8의 경우는 SCWB2의 경우와 마찬가지로 손상 후의 경우가 지진응답이 약간 크지만 그 차이는 작다. 이는 SCWB8의 경우가 부재수가 SCWB2 보다 상대적으로 많기 때문에 특정한 하나의 부재의 손상이 전체 구조계의 지진응답에 미치는 영향이 상대적으로 작다고 할 수 있다. 그림 12에는 각 예제구조물에 대하여 손상 전과 손상 후의 비탄성 변형에너지를 비교하였다. SCWB2의 경우가 SCWB8의 경우보다 손상 후에 경우에 비탄성 변형에너지의 증가가 두드러짐을 알 수 있는데, 이는 8층 구조물의 경우에는 구조부재의 수가 2층 구



(a) SCWB2



(b) SCWB8

그림 12 비탄성 변형에너지의 비교(El Centro 지진)

조물보다 훨씬 많으므로 모멘트의 재분배를 통하여 손상부위에 비탄성 거동이 집중되는 것이 2층 구조물보다는 방지되기 때문이다.

특정한 구조부재의 손상이 전체구조계의 지진응답에 미치는 영향의 분석을 통하여 손상부재에 비탄성 거동이 집중되는 현상이 발생하고 이 결과 비탄성 변형에너지의 증가로 인하여 손상부재가 지진하중에 대하여 지진손상을 입을 가능성이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 구조부재가 적은

구조물일수록 구조부재의 항복 후의 지진하중의 재분배가 원활하지 않으므로 손상부재에 비탄성 거동이 집중될 가능성이 높음을 알 수 있다. 이 결과는 3.2.3절의 지진손상도 해석을 통하여 더 명확하게 알 수 있다.

3. 2. 2 회전연성도 능력의 평가

회전연성도 능력은 지진에너지 소산능력을 나타내는 데 유용하게 사용될 수 있다. 표 8와 9에는 예제구조물에 대한 손상 전과 손상 후의 회전연성도 능력을 나타내었다. 이 표들로부터 예제 구조물들은 강기둥-약보의 구조물이므로 회전연성도 능력의 해석결과도 강기둥-약보의 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 예제구조물 SCWB8에서 3층과 4층부분의 보의 회전연성도 능력이 다른 층의 보에 대한 회전연성도 능력보다 상당히 작음을 알 수 있는데, 이는 아랫층일수록 단면이 큰 부재를 사용하였기 때문에 회전연성도 능력도 아랫층일수록 클 것이라는 일반적인 견해와는 맞지 않는다. 이런 결과는 회전연성도 능력의 평가에 사용된 경험식 (8)이 모든 부재에 대하여 합리적인 결과를 산출하지는 못함을 나타낸다. 그러나, 지금까지 회전연성도 능력의 평가를 위한 해석적인 기법이 전무하였으므로 본 연구에서 사

용한 경험식은 회전연성도 능력을 근사적이지만 평가 가능하게 하여준다는 데에 의미가 있다. 손상 전과 손상 후에 대한 구조물의 회전연성도 능력 평가를 통하여 특정한 구조부재의 강성이 30% 감소했을 때 회전연성도 능력은 SCWB2의 손상부재의 경우에는 36.1% 감소하였고, SCWB8의 손상부재의 경우에는 72.7% 감소하였음을 알 수 있다.

3. 2. 3 지진손상도 해석

구조물의 지진손상도 해석은 기설구조물의 노후화 및 손상에 따른 지진위험도를 평가가능하게 함으로서, 기설구조물을 내진보강하여야 할 것인지의 여부 및 내진보강의 정도를 결정하는데 도움을 준다. 본 연구의 지진손상도 해석에서는 가장 널리 사용되고 있는 Park & Ang 방법을 사용하였다. 지진손상도 해석에 이용되는 구조물의 지진요구도인 회전연성도요구도와 비탄성 변형에너지의 분포를 그림 13~16에 나타내었다. 이 그림들에서 지진응답의 크기는 그림의 오른쪽에 나타낸 기준값에 대한 원의 상대적인 크기로서 나타내었다. SCWB2는 El Centro 지진에 대하여 손상 후의 경우가 손상 전의 경우에 비하여 손상부재에서의 회전연성도요구도의 증가가 비탄성 변형에너지의 증가보다 상당히 큼을 알 수 있다.

표 8 SCWB8에 대한 손상 전과 손상 후의 구조부재의 회전연성도 능력(μ_m)

ID.	부재단면	α_f	α_w	α_l	λ	μ_m
IC4	W24×55	6.332	48.532	49.050	0.501	9.5
IC3	W24×84	5.347	40.788	33.706	0.244	14.93
IC2	W24×94	4.729	37.224	33.195	0.194	16.52
IC1	W24×131	6.112	31.686	22.130	0.143	18.64
EC4	W14×48	12.299	29.534	34.412	0.416	11.03
EC3	W14×74	5.855	22.315	26.503	0.115	20.12
EC2	W14×90	9.334	23.340	17.764	0.129	19.35
EC1	W14×99	9.364	21.175	17.716	0.117	20.02
B4	W18×40	5.230	44.919	103.507	0.809	4.96
B3	W21×50	5.571	43.842	101.118	0.821	4.79
B2	W24×55	6.332	48.532	98.100	1.003	2.48
B1	W24×68	6.996	46.193	70.296	0.755	5.68

주) (*): 손상에 의해 강성이 30% 감소한 경우

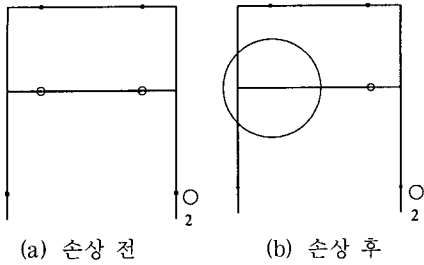


그림 13 회전 연성요구도의 비교 (SCWB2, El Centro 지진)

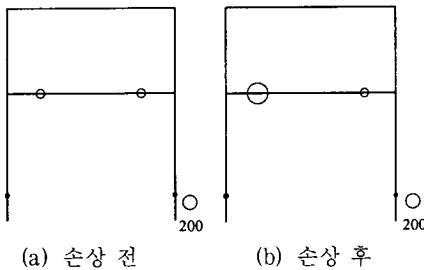
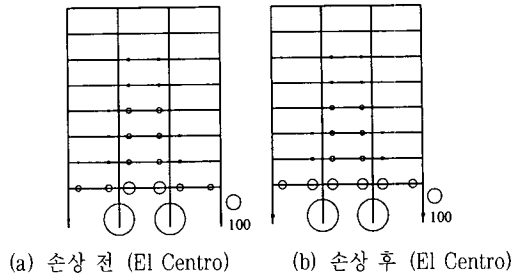
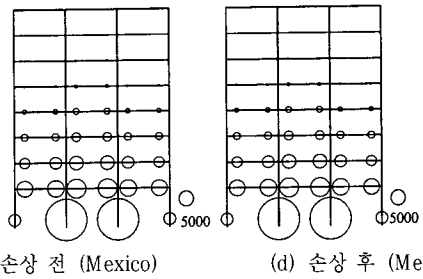


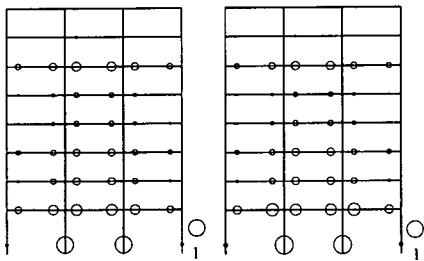
그림 14 비탄성 변형에너지의 비교 (SCWB2, El Centro 지진, 단위: kips-in)



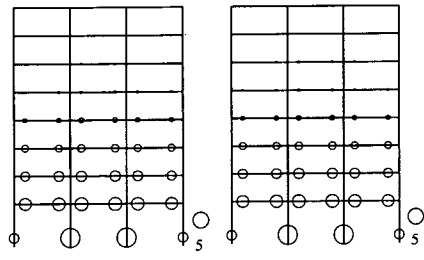
(a) 손상 전 (El Centro) (b) 손상 후 (El Centro)



(c) 손상 전 (Mexico) (d) 손상 후 (Mexico)
그림 16 비탄성 변형에너지의 비교 (SCWB8, 단위: kips-in)



(a) 손상 전 (El Centro) (b) 손상 후 (El Centro)



(c) 손상 전 (Mexico) (d) 손상 후 (Mexico)

그림 15 회전 연성요구도의 비교 (SCWB8)

이는 El Centro 지진이 많은 횡수의 비탄성 거동을 유발하지는 않기 때문에 비탄성 변형에너지의 증가가 최대 응답의 영향만을 반영하는 회전연성 요구도의 증가보다는 작게 나타나기 때문이다. 또한, 구조부재의 갯수가 작기 때문에 비탄성 거동이 손상부재에 집중되었기 때문이기도 하다. SCWB8의 경우는 SCWB2에 비하여 손상부재의 비탄성 거동의 집중현상은 항복후의 지진하중의 재분배에 의해 크지 않음을 알 수 있으며, 손상부재의 인접부재에 비탄성 거동이 많이 집중됨을 알 수 있다. SCWB8에서 손상부재에서 소산된 비탄성 변형에너지는 손상 전보다 오히려 감소하였는데 이는 손상부재의 강성의 감소에 따른 항복모멘트가 감소하여 에너지 소산능력이 감소하였기 때문이다. 그러므로 손상부재의 인접부재에 비탄성 거동의 증가가 유발되었다. 그림 13~16에 나타난 각 구조부재에서 구한 회전연성요구도와 비탄성 변형에너지는 지진손상도를 평가하기 위한 지진요구도로서 Park & Ang 방법에 적용되었고, 표 8~9에 나타난 구조부재들의 회전연성도 능력은 구조물의 내진능력으로서 Park &

Ang 방법에 적용되어 지진손상도 해석에 사용되었다. 이 지진손상도 해석 결과를 그림 17~18에 나타내었다. 이 결과로부터 SCWB2의 손상부재의 손상이 SCWB8의 손상부재의 손상보다 상당히 크을 알 수 있으며, 이는 8층 구조물은 부재 갯수가 상대적으로 많으므로 구조부재의 항복 후 지진하중의 재분배가 2층 구조물보다 원활하게 이루어져 손상부재의 비탄성 거동이 집중되는 정도가 상대적으로 작았기 때문이다. SCWB8에

서 Mexico 지진의 경우가 El Centro 지진의 경우보다 지진손상도가 크며 이는 Mexico 지진의 주된 주기성분이 2초대로서 예제구조물의 고유진동주기(1.68초)와 비슷하므로 El Centro 지진에 비하여 많은 비탄성 거동을 유발하였기 때문이다. 또한 그림 18로부터 3층과 4층의 보들이 지진손상도가 큰 것으로 평가되었는데, 이는 3층과 4층의 구조부재들에 대한 회전연성도 능력이 경험식에 의해 상대적으로 작게 평가되었기 때문이다. 즉, 3층과 4층의 보들의 내진능력이 과소평가된 결과이다. 그러므로 회전연성도 능력을 평가하기 위한 경험식의 개선에 관한 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 기설구조물에 대한 손상도 추정 기법과 내진능력평가 방법에 대하여 연구하였다. 일반적으로 구조물의 모든 자유도에 대해서 계측하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 본 연구에서는 모드섭동법을 사용하여 구조물의 손상도를 추정하였다. 또한 제안된 모드섭동법에 의한 손상도 추정기법을 검증하기 위하여 예제구조물에 대해서 손상도 추정을 수행하였다. 그 결과, 제안된 모드섭동법이 제한된 계측자료를 이용하여 손상도 추정을 수행할 경우 매우 효율적임을 알 수 있었고, 특히 구조물이 복잡한 경우에도 구조물의 일부분에 대한 손상도 추정을 반복적으로 수행하여 전체 구조에 대한 손상도 추정이 가능함을 보였다.

또한, 기설 구조물의 노후화 및 손상에 따른 구조물의 내진능력을 평가할 수 있는 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 손상도 추정결과를 토대로 손상구조물의 지진손상도 해석을 수행하여 구조물의 손상이 지진응답 및 지진손상도에 미치는 영향을 분석하였다. 각 구조부재의 회전연성도 능력은 경험식을 통하여 평가하였는데 이를 통하여 강성의 감소가 회전연성도 능력에 미치는 영향은 강성의 감소정도에 비하여 크다고 할 수 있다. 또한, 지진손상도 해석을 통하여서도 손상

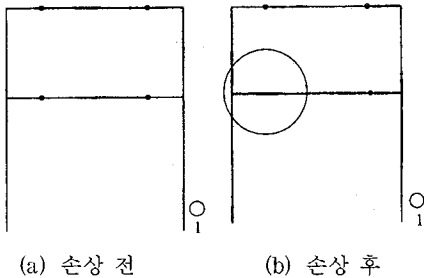
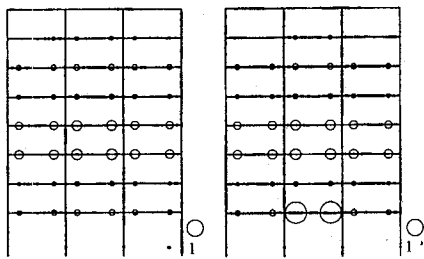
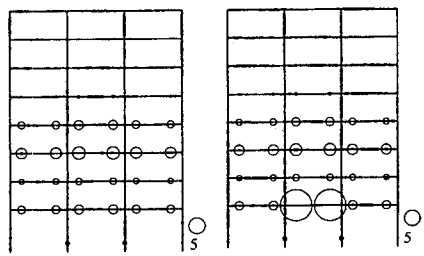


그림 17 손상 지수의 비교 (SCWB2, El Centro 지진)



(a) 손상 전 (El Centro) (b) 손상 후 (El Centro)



(c) 손상 전 (Mexico) (d) 손상 후 (Mexico)

그림 18 손상 지수의 비교

부재에 지진손상의 집중 현상이 큼을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 개발된 기설구조물의 내진능력 평가시스템은 지진에 대하여 취약한 구조물의 내진보강의 여부 및 내진보강의 정도를 결정하는 데 많은 도움을 주리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원 방재연구센터의 1997년 위탁연구에 의해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. K.A. Stetson and I.R. Harrison, "Redesign of Structural Vibration Modes by Finite-Element Inverse Perturbation", *J. Engng. Power, ASME*, Vol. 103, 1981
2. C.J. Hoff, M.M. Bernitsas, R.E. Sandstorm and W.J. Anderson, "Inverse Perturbation Method for Structural Redesign with Frequency and Mode Shape Constraints", *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 9, 1984
3. T.W. Lim, "Structural Damage Detection Using Modal Test Data", *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 12, 1991
4. 홍규선, "동특성 측정에 의한 구조물의 손상도 추정", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993
5. 민진기, 김형기, 홍규선 윤정방, "구조물 손상의 추정을 위한 Inverse Modal Perturbation 기법", 대한토목학회 논문집, 제10권 제4호, 1990
6. Daali, M.L. and Korol, R.M., 'Adequate ductility in steel beams under earthquake-type loading', *Engng Struct.* 1996, 18 (2), pp.179~189
7. Park, Y.J. and Ang, A. H.-S., 'Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete', *J. Struct. Engng, ASCE* 1985, 111, pp.722~739
8. Cosenza, E. Manfredi, G. and Ramasco, R., 'The use of damage functionals in earthquake engineering: comparison between different methods', *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1993, 22, pp.855~868
9. 송종걸, "강구조물의 시스템 지진응답 산정과 지진손상도 해석", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1997
10. Uang, C. M. and Bertero, V. V. 'Evaluation of seismic energy in structures', *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1990, 19, pp.77~90
11. Powell, G.H. and Allahbadi, R., 'Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures', *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1988, 16, pp.719~734
12. Roeder, C.W., Schneider, S.P. and Carpenter, J. E. 'Seismic behavior of moment-resisting steel frames: analytical study', *J. Struct. Engng, ASCE* 1993, 119 (6), pp. 1866~1884
13. Tsai, K.C. and Li, J.W. 'DRAIN2D+ - A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor', *Report No. CEER/R83-03*, National Taiwan Univ., 1994
14. Lee, D.-G., Song, J.-K. and Yun, C.-B., 'Estimation of system-level ductility demands for multistory structures', *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, pp.1025~1035, 1997.
15. 송종걸, 윤정방, 이동근, '지진에 대한 강구조물의 피로손상도 추정법', 한국강구조학회 논문집, 제9권 제1호, pp.95~105, 1997
16. 이동근, 송종걸, 윤정방, '지진에 대한 고층구조물의 시스템 연성요구도 평가방법', 대한토목학회 논문집, 제17권 제I-2호, pp.245~257, 1997

(접수일자 : 1998. 4. 14)