

기설구조물의 손상도추정 및 내진능력평가 방법에 관한 연구

Damage Assessment and Aseismic Capacity Evaluation of Existing Structures

윤 정 방* 송 중 결** 김 유 진***
Chung-Bang Yun Jong-Keol Song Yoo-Jin Kim

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 a building structure subjected to different earthquake excitations.

1. 서 론

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 섭동방정식으로 부터 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 내진능력을 평가하였다. 내진능력은 구조부재에서 연성도 능력의 경험식을 이용하여 평가하였고, 지진손상도의 평가는 가장 많이 사용되는 방법인 Park & Ang 방법을 사용하였다.

* 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 한국과학기술원 토목공학과 연수연구원
*** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2. 동특성 추정에 의한 손상도 평가 기법

2.1 모드섭동법을 이용한 구조물의 손상도 추정기법

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

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

이 식을 손상에 의한 구조계의 변화량 Δ 와 행렬 C 를 사용하여 나타내면 다음과 같은 2차-섭동식을 얻을 수 있다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi' = [\mu_k] \{C^T \Lambda' - \Lambda C^T + \Delta \Lambda\} \quad (2)$$

여기서 $\Phi' = \Phi(I + C^T)$ 이고 $[\mu_k] = \Phi^T M \Phi$ 이다. 그러나 이 식은 좌변에 있는 손상후의 모드형상을 구조물의 전 자유도에 대해 완전하게 측정할 수 없기 때문에 강성행렬의 변화량을 바로 구할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 먼저 1차 섭동식을 이용하여 근사적으로 강성행렬의 변화량을 구한 뒤, 이 강성행렬의 변화에 대한 새로운 모드형상을 계산하고, 이 모드형상을 2차 섭동식의 해를 구하는 방법을 고안하였다.

섭동식의 해는 다음과 같이 고유진동수의 변화량에 대한 관계식의 제공한 오차를 목적함수로 하고, 모드형상과 관련된 식을 구속 조건식으로 하여 Quadratic Programming 기법을 사용하여 구하였다.

$$\min J = \sum_{k=1}^{n_k} \left\{ w_k \left(\sum_{e=1}^l \phi_k^T K_e \phi'_k \alpha_e - \mu_k (1 + C_{kk}) \Delta \lambda_k \right) \right\}^2 \quad (3)$$

2.2 예제구조물의 손상도 추정

모드섭동법에 의한 구조물의 손상도 추정기법을 검증하기 위하여 그림 1과 표 1에 나타난 예제구조물을 대상으로 손상도 추정을 수행하였다. 설계된 예제구조물은 강기둥-약보(SCWB)의 설계개념에 따른 8층 구조물이고 손상도 추정을 위해 예제 구조물을 프레임 요소를 사용한 유한요소모형으로 모형화하였다. 각 층의 집중질량은 $0.45 \text{ kips} \cdot \text{sec}^2/\text{in}$ 로 하여 고유진동주기가 1.684 초로 계산되었다.

구조물의 손상은 46번 요소와 56번 요소의 강성이 동시에 각각 30%, 50% 감소했다고 가정하였다. 실제로 동적 구조실험을 수행할 경우 모든 자유도에서 계측할 수 없기 때문에 제한된 절점에서의 계측 자료를 이용하였다. 손상요소의 위치와 계측점을 그림 2에 나타내었다.

손상도 추정을 위하여, 계측된 고유진동수 4개와 8개의 절점에서 계측한 모드형상 3개를 사용한 모

드섭동법을 이용하였다. 또한 손상도 추정을 보다 효과적으로 수행하기 위하여, 그림 2와 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 속한 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 2와 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 감성저하에 근거한 지진응답 및 내진능력 평가

3.1 연성도 능력 및 지진손상도 평가법

구조물의 비탄성 거동은 부재 끝단의 소성힌지에 집중되므로 연성도 능력의 평가는 내진능력 평가에 유용하다. 구조부재의 연성도 능력을 예측하기 위하여는 I형상의 단면을 가진 구조부재에 대한 실험 결과들로부터 다음과 같은 경험식이 정의되었다.

$$\mu_m = 1 - 9.2\lambda + 10.71\lambda^{-0.293} \quad (4)$$

여기서 $\lambda = \frac{\alpha_f \alpha_w \alpha_l}{30072}$ 이고, $\alpha_f = \frac{b}{t\varepsilon}$, $\alpha_w = \frac{d}{\omega\varepsilon}$, $\alpha_l = \frac{L}{r_y\varepsilon}$, $\varepsilon = \left(\frac{300}{\sigma_y}\right)^{1/2}$ 이다.

λ 는 유효수평세장비이며, 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_y 는 약축에 대한 회전반경이며, σ_y 는 항복응력으로서 단위는 MPa를 사용한다.

일반적으로 지진손상도 해석방법은 구조물의 연성도와 비탄성 거동에 의해 소산시킨 에너지를 주된 손상변수로 사용한다. Park 과 Ang 이 제안한 손상함수는 가장 많이 사용되고 실험결과와도 비교적 잘 일치하므로 본 연구에서는 이 방법을 사용하였다. Park & Ang 방법에 의한 지진손상도는 최대변위와 소산된 비탄성 변형에너지의 선형조합에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$D_{PA} = \frac{x_{max}}{x_{u,mon}} + \beta \frac{E_h}{F_y x_{u,mon}} = \frac{\mu + \beta(\mu_e - 1)}{\mu_{u,mon}}; \mu_e = \frac{E_h}{F_y x_y} + 1 \quad (5)$$

여기서, x_{max} 는 최대변위이고, $x_{u,mon}$ 는 최대변위의 허용값이다. β 는 구조요소의 성질저하 정도를 나타내는 변수이고, 실험결과에 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_y 는 항복변위이다.

3.2 예제 해석

예제구조물 1층의 가운데 보에 30% 강성이 저하된 경우에 대해서 예제해석을 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.

연성도 능력(ductility capacity)은 에너지 소산능력을 나타내는 데 유용하게 사용될 수 있다. 표 4에는 예제구조물에 대한 손상 전과 손상 후의 회전연성도 능력을 나타내었다. 예제구조물은 강기둥-약보의 구조물이므로 연성도 능력 또한 강기둥-약보의 형태를 나타내고 있다. 예제구조물에서 3층과 4층부분의 보의 회전연성도 능력이 다른 층의 보에 대한 연성도 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 경험식이 모든 부재에 대하여 합리적인 결과를 산출하지는 못함을 나타낸다. 그러나, 지금까지 연성도 능력의 평가를 위한 해석적인 기법이 전무하였으므로 본 연구에서 사용한 경험식은 회전연성도 능력을 근사적이지만 평가 가능하게 하여준다는 데에 의미가 있다. 손상 전과 손상 후에 대한 구조물의 회전연성도 능력 평가를 통하여 특정한 구조부재(B1)의 강성이 30 % 감소했을 때 이 부재에 대한 회전연성도 능력은 5.68 에서 1.55 로 72.7 % 감소하였음을 알 수 있다.

구조물의 지진손상도 해석은 기설구조물의 노후화 및 손상에 따른 지진위험도를 평가 가능하게 함으로서, 기설구조물을 내진보강하여야 할 것인지의 여부 및 내진보강의 정도를 결정하는데 도움을 준다. 지진손상도 해석을 위하여 각 구조부재에서의 비탄성 변형에너지 및 회전연성요구도를 평가한 후 이를 Park & Ang 방법에 적용하여 손상지수를 평가하였고 이 결과를 그림 5 에 나타내었다. 그림 5 에서 손상지수의 크기는 기준값에 대한 원의 상대적인 크기로서 나타내었다. Mexico 지진의 경우가 상대적으로 지진손상도가 크며 이는 Mexico 지진의 주된 주기성분이 2초대로서 예제구조물의 고유진동주기와 비슷하므로 El Centro 지진에 비하여 많은 비탄성 거동을 유발하였기 때문이다. 또한 그림 5 로부터 3 층과 4 층의 보들이 손상도가 큰 것으로 평가되었는데 이는 연성도 능력이 경험식에 의해 상대적으로 작게 평가되었기 때문이다. 즉, 3 층과 4 층의 보들의 내진능력이 과소평가된 결과이다. 그러므로 연성도 능력을 평가하기 위한 경험식의 개선이 요구된다.

4. 결 론

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.

본 연구과제를 통하여 기설 구조물의 노후화 및 손상에 따른 구조물의 내진능력을 평가할 수 있는 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 손상도 추정결과를 토대로 손상구조물의 지진손상도 해석을 수행하여 구조물의 손상이 지진응답에 미치는 영향을 분석하였다. 각 구조부재의 연성도 능력은 경험식을 통하여 평가하였는데 이를 통하여 강성의 감소가 연성도 능력에 미치는 영향은 강성의 감소정도에 비하여 크다고 할 수 있다. 또한, 지진손상도 해석을 통하여서도 손상부재에 지진손상의 집중 현상이 큼을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 개발된 기설구조물의 내진능력 평가시스템은 지진에 대하여 취약

한 구조물의 내진보강의 여부 및 내진보강의 정도를 결정하는 데 많은 도움을 주리라 판단된다.

5. 감사의 글

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

6. 참고 문헌

1. Daali, M. L. and Korol, R. M., 'Adequate ductility in steel beams under earthquake-type loading', *Engng Struct.* 1996, **18** (2), 179-189
2. Fajfar, P. and Gaspersic, P., 'The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings', *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1996, **25**, 31-46
3. 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.
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*, 제 10 권, 제 4 호, 1990

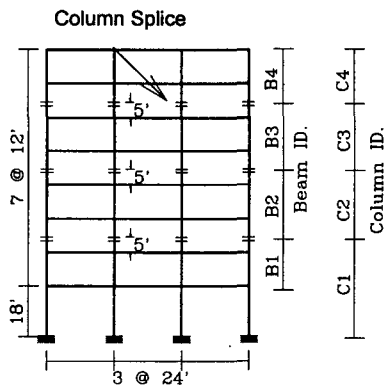


그림 1. 예제 구조물 SCWB8

표 1. 예제구조물 SCWB8에 사용된 단면

Member ID.	SCWB8
(a) Interior Columns	
C4	W24X55
C3	W24X84
C2	W24X94
C1	W24X131
(b) Exterior Columns	
C4	W14X48
C3	W14X74
C2	W14X90
C1	W14X99
(c) Girders	
B4	W18X40
B3	W21X50
B2	W24X55
B1	W24X68

표 2. 각 단계에 따른 손상지수의 변화

	요소 번호	추정된 손상지수			
		1 단계	3 단계	5 단계	7 단계
그룹 1	45	0.045	0.072	0.077	0.068
	46	-0.155	-0.255	-0.284	-0.284
	47	0.045	0.072	0.080	0.073
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
그룹 2		2 단계	4 단계	6 단계	
	54	0.021	0.023	0.000	
	55	0.021	0.023	0.000	
	56	-0.292	-0.453	-0.504	
	57	0.021	0.023	0.000	
	⋮	⋮	⋮	⋮	

표 3. 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 4. 예제구조물 SCWB8 에 대한 손상전과 손상후의 구조부재의 연성도 능력(μ_m)

ID	부재단면	α_f	α_w	α_l	λ	μ_m
IC4	W24X55	6.332	48.532	49.050	0.501	9.5
IC3	W24X84	5.347	40.788	33.706	0.244	14.93
IC2	W24X94	4.729	37.224	33.195	0.194	16.52
IC1	W24X131	6.112	31.686	22.130	0.143	18.64
EC4	W14X48	12.299	29.534	34.412	0.416	11.03
EC3	W14X74	5.855	22.315	26.503	0.115	20.12
EC2	W14X90	9.334	23.340	17.764	0.129	19.35
EC1	W14X99	9.364	21.175	17.716	0.117	20.02
B4	W18X40	5.230	44.919	103.507	0.809	4.96
B3	W21X50	5.571	43.842	101.118	0.821	4.79
B2	W24X55	6.332	48.532	98.100	1.003	2.48
B1	W24X68	6.996	46.193	70.296	0.755	5.68
B1	W24X68 (강성이 30% 감 소한 경우)	9.994	46.193	70.296	1.079	1.55

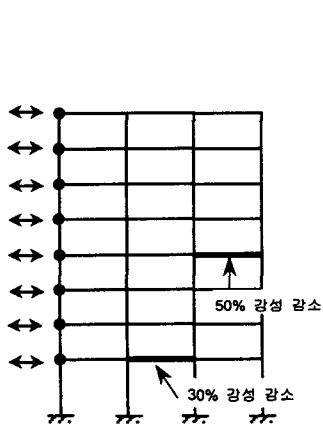


그림 2. 계층 위치와 손상부재

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

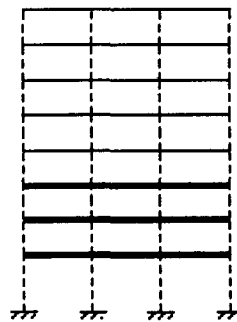
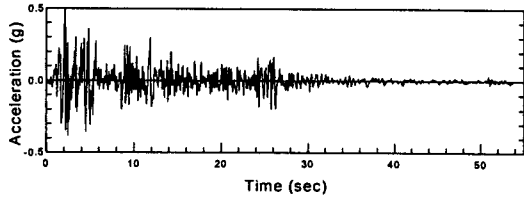
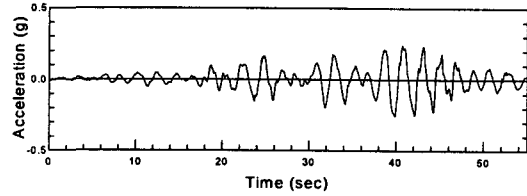


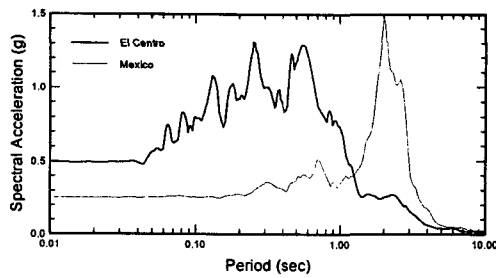
그림 3. 손상지수 추정을 위해 분류한 그룹



(a) El Centro 지진 (남북방향 성분, 1940)



(b) Mexico 지진(동서방향 성분, 1985)



(c) 5% 감쇠계수에 대한 탄성응답스펙트럼

그림 4. 입력 지진가속도 (EPA가 0.4g가 되도록 스케일 조정)

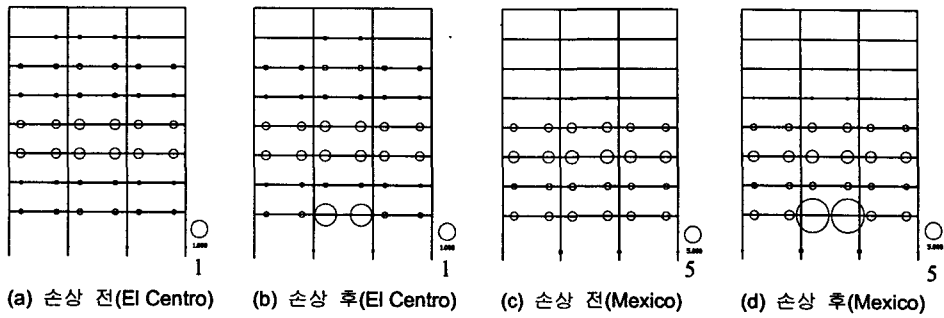


그림 5. 손상 지수의 비교 (El Centro 지진, Mexico 지진)