

강구조물의 구조요소 및 구조계에 대한 지진손상도 해석

Seismic Damage Analysis for Element-Level and System-Level of Steel Structures

송 종 곁* 윤 정 방** 이 동 근***
Song, Jong Keol Yun, Chung Bang Lee, Dong Guen

국문요약

본 연구에서 구조요소 및 구조계에 대한 지진손상 해석방법의 개념 및 과정을 연구하였다. 구조요소에 대한 지진손상도 해석은 구조요소나 단자유도계에 관한 기존의 방법으로 가장 널리사용되고 있는 Park & Ang 방법에 의하여 예제구조물에 대하여 수행하였다. 구조계에 대한 지진손상도 해석을 수행하기 위해서는 두 가지의 과정을 사용하였다. 첫번째 과정은 구조계에 해당하는 지진응답을 구조계 대표응답법과 등가단자유도계 응답법을 이용하여 구한 후, 구조계의 지진손상도는 기존의 단자유도계나 구조요소에 관한 방법을 이용하여 구조계의 지진응답으로부터 구한다. 두번째 과정은 구조요소에 대한 지진손상도 해석결과를 손상지수 조합법을 이용하여 선형적으로 조합하여 구조계의 지진손상도를 구한다. 각 방법의 유용성은 몇 개의 다른 지진과 예제구조물에 대하여 비교를 통하여 연구하였다.

주요어 : 지진손상, 내진설계, 시스템 지진응답, 연성도, 비탄성 변형에너지, 손상지수

ABSTRACT

In this study, the concepts and procedures of the seismic damage analysis methods are examined for both the element-level and the system-level. The seismic damage analysis at the element-level is performed for several example structures using existing method for structural elements or single-degree-of-freedom (SDOF) systems such as the Park and Ang method. In order to analyze seismic damage at the system-level, two types of procedures are used. In the first type of procedure, the system-level seismic responses can be estimated by using the system representative response method (SRRM), or the equivalent SDOF system response method (ESDOF-SRM). Then, the system-level seismic damage is analyzed from the system-level seismic responses using existing method for structural elements or SDOF systems. In the second type of procedure, the system-level seismic damages are analyzed using the element damage combination method (EDCM) combing the element-level damage indices determined by existing method. To compare tendency of the seismic damage analysis using each methods, example analysis is accomplished for several cases of different structures and different earthquake excitation.

Key words : seismic damage, earthquake resistant design, system-level seismic response, ductility, hysteretic energy, damage index

1. 서 론

대부분의 내진설계기준에서 정의하고 있는 설계하중은 탄성응답스펙트럼을 반응수정계수에 의하여 감소시킨 비탄성 응답스펙트럼으로

부터 구하기 때문에, 설계 지진하중하에서의 등가 탄성시스템에 예상되는 최대 관성력보다 상당히 작게 고려하고 있다. 또한, 현재까지의 구조물의 내진설계는 탄성해석에 의하여 수행되고 있기 때문에, 구조물이 비탄성 거동을 하는 경우에는 이에 대한 적절한 고려가 내진 설계기법에 반영되고 있지 않다. 강한 지진하

* 한국과학기술원 토목공학과 연수연구원

** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 교수

*** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

중하에서 구조요소 혹은 구조계는 많은 횡수의 반복적인 비탄성 거동을 하게 되고, 이 결과 손상을 입게 된다. 그러므로, 구조물의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 많은 양의 지진에너지를 소산시킬 수 있는 구조물의 연성도 능력이 확보되어야 한다. 이러한 배경으로부터 지진공학 분야에서는 강한 지진에 의해 구조물이 얼마나 큰 비탄성 거동을 하게 되며 이 비탄성 거동이 구조물에 어느 정도의 손상을 줄 것 인지가 주요 관심사로 대두되고 있는 실정이다. 지진손상도 해석은 기설 구조물의 내진능력 정도의 평가를 가능하게 함으로서 지진하중에 취약한 기설 구조물의 내진보강의 여부를 결정하는데 유용하다. 구조요소들에 관한 지진손상도 해석은 내진보강이 필요한 구조요소를 결정하는데 유용하리라 판단되며, 구조계에 대한 지진손상도 해석은 재정이 부족한 경우에 내진보강이 필요한 구조물의 우선순위를 결정하는데 유용하게 적용되리라 판단된다. 최근에 국내에서도 연속적으로 지진이 발생하여 우리나라도 지진에 대한 안전지대가 아닌가 하는 우려가 대두되고 있는 시점에서 지진손상도 해석에 관한 연구는 기설 구조물의 안전성과 신뢰성을 확보하여 주는 중요한 역할을 하므로 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 여러 가지 원인에 의하여 노후화되어 내진능력이 부족한 구조물의 내진보강의 여부 및 정도를 평가하는데 필요한 지진손상도 해석의 연구를 구조요소와 구조계에 대하여 연구하고 이 방법들의 효율성을 비교하는 것이다.

구조물의 지진손상도를 해석하기 위해서는 어떠한 손상 응답변수를 선택하는가가 중요하다. 손상 응답변수는 구조물의 손상도와 많은 연관성이 있으며 간편하고 정확하게 평가할 수 있는 값이라야 한다. 변위의 절대최대치를 구조물의 항복변위로 나눈 값으로 정의되는 변위 연성도를 사용하는 연성도 방법⁽¹⁾은 지진하중에 의한 연성요구도와 구조물의 연성도 능력의 비교에 의해 손상도를 추정한다. 연성

도 방법은 최대응답에 의한 지진손상도만을 반영하고 최대응답 이외의 응답에 의한 영향은 반영하지 않으므로 다른 손상도 추정방법에 비하여 상대적으로 작은 지진손상도 추정값을 나타낸다. 그러나 변위 연성도는 구조물의 내진설계를 위한 비탄성 설계응답 스펙트럼을 만드는 주된 변수로 널리 사용되고 있기 때문에, 연성도 개념이 일반적으로 손상도 추정방법에 널리 반영되고 있다.

비탄성 변형에너지를 손상변수로서 사용하는 에너지 방법⁽¹⁾은 지진하중을 받는 구조물이 비탄성 거동에 의하여 소산시킨 에너지의 양과 구조물이 소산시킬 수 있는 에너지 능력과의 비교에 의하여 손상도를 추정한다. 이 방법은 모든 응답에 의해 소산된 비탄성 변형에너지의 합으로부터 손상도를 추정하기 때문에 다른 방법에 비하여 큰 값을 나타낸다. 즉, 이 방법은 모든 응답이 구조물의 지진 손상도에 주는 영향이 동일하다고 간주하는 방법이다. 근래에는 앞에서 설명한 연성도 방법 및 에너지 방법을 조합한 방법들을 구조물의 지진손상도 해석을 위하여 많이 사용하고 있으며, 그 중에서 가장 널리 사용되고 있고 가장 대표적인 것이 Park & Ang 방법⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾이다. 이 방법에서 최대응답에 의한 구조물의 지진손상도는 연성도 방법을 이용하여 구하고, 반복적인 비탄성 거동에 대한 손상현상인 소성피로에 의한 지진손상도는 에너지 방법을 이용하여 구하고 이들을 선형적으로 조합하여 지진 손상도를 산정한다. 본 연구에서 구조요소들에 대한 지진손상도는 Park & Ang 방법을 이용하여 예제 해석을 통하여 수행하였다.

구조계에 대한 지진손상도 해석은 구조요소 혹은 단자유도계에만 적용이 가능한 기존의 방법에 구조계의 전체적인 손상도를 반영할 수 있는 합리적인 개념이 추가가 되어야 가능하다. 본 연구에서는 두 가지 종류의 방법이 사용되었으며, 그 중 하나는 구조계의 지진응답을 구조계 대표응답법 혹은 등가단자유도계 응답법^{(7),(20)}을 이용하여 구한 후, 이를 기존의

방법에 적용하는 방법이다. 다른 하나는 구조 요소들에 대하여 기존의 방법을 이용하여 손상지수들을 구한 후, 이 손상지수들을 손상지수 조합법⁽⁶⁾을 이용하여 선형적으로 조합하는 방법이다. 각 방법들의 경향 및 유용성은 예제 해석을 통하여 연구하였다.

2. 구조요소 및 단자유도계에 대한 지진손상도 해석법

일반적으로 구조요소 및 단자유도계에 대하여 적용 가능한 지진손상도 해석방법은 구조물의 연성도와 비탄성 거동에 의해 소산시킨 에너지를 주된 손상변수로 사용한다. 연성도를 손상변수로 사용하는 방법⁽¹⁾(연성도 방법)은 구조물의 연성도 능력이 제한적이라는 가정하에서 지진하중에 의해 유발된 연성요구도가 단조하중 조건하에서 실험을 통하여 구해진 붕괴 상태에서의 연성도인 연성도 능력과 같아진다면 붕괴가 발생한다는 개념으로 손상도를 평가한다. 이 방법은 연성요구도가 항복변위에 대한 최대변위의 비로서 구해지므로 즉, 구조물의 최대응답에 의해서 결정되기 때문에 지진손상도의 평가에 최대응답의 영향만 반영된다. 그러므로 비탄성 반복거동에 의한 소성 피로의 영향은 반영하지 못하는 단점이 있다.

비탄성 거동에 의해 소산시킨 에너지를 손상변수로 사용하는 방법⁽¹⁾(에너지 방법)은 구조물이 지진에너지를 소산시킬 수 있는 능력이 제한적이라는 가정하에서, 지진하중에 의한 비탄성 거동으로부터 소산된 에너지가 구조물이 가진 에너지 소산능력과 같아진다면 붕괴가 발생한다는 개념으로 손상도를 평가한다. 이 방법은 반복적인 비탄성 거동의 영향을 소산된 에너지의 양으로서 반영할 수 있는 장점이 있다. 소산된 에너지의 합을 손상변수로 취급하기 때문에 모든 비탄성 응답에 의한 영향이 동일한 가중치로 반영되는 단점이 있다. 실제의 지진손상 현상은 적은 횟수의 큰 응답폭의 비탄성 거동이 많은 횟수의 작은 응답폭의

거동보다 소산시킨 에너지는 작더라도 지진손상도에는 더 많은 영향을 주기 때문이다. 그러므로 에너지 방법은 지진손상도를 다른 방법에 비하여 상대적으로 과대 평가한다⁽¹⁾. 피로 손상을 고려한 지진손상도 평가에서는 비탄성 거동의 크기에 따른 가중치를 적용하는 것이 일반적인 방법이다. 이는 변위를 손상변수로 하는 경우에는 가중치의 적용이 가능하나 에너지 소산을 손상변수로 사용하는 경우는 가중치의 적용이 어렵기 때문이다.

연성도 방법과 에너지 방법의 단점을 보완하면서 이 두 방법을 선형적으로 조합한 방법이 실제의 지진손상도를 평가하기에 가장 적절하기 때문에 많이 사용되고 있으며 실험결과와도 비교적 잘 일치하는 결과를 제시한다. 이 방법중에서 Park과 Ang이 제안한 손상함수는 연구문헌에 가장 많이 사용되고 있기 때문에 본 연구에서는 이 방법을 사용하였다. Park & Ang방법에 의한 지진손상도는 최대변위와 소산된 비탄성 변형에너지의 선형조합에 의해 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

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

$$\mu_e = \frac{E_h}{F_y x_y} + 1 \quad (1)$$

여기서, x_{max} 는 최대변위이고, $x_{u,mon}$ 는 최대변위의 허용값이다. β 는 구조요소의 성질저하 정도를 나타내는 변수이고, 실험결과⁽²⁾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 하중조건 실험에 의해 결정된 구조물의 붕괴 상태에서 최대변위를 항복변위로 나눈 값이다. μ_e 는 비탄성 변형에너지를 연성도의 개념으로 나타

낸 이력연성도이고, x_y 는 항복변위이다.

이 손상도 함수는 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. 구조계에 대한 지진손상도 해석법

현재까지 연구된 지진손상도 추정법의 대부분은 단자유도계 혹은 구조요소에 대한 응답 결과로부터 지진손상도를 추정하게 하므로, 실제의 다자유도 구조물의 구조계에 대한 지진손상도 해석에 이 연구결과들을 적용할 방법은 명확하게 제시되지 않고 있다. 그러나, 다음에 설명한 방법들을 이용한다면 기존의 지진손상도 추정법을 실제의 다자유도 구조물의 구조계에 대한 지진손상도 추정에 적용할 수 있다.

3.1 구조계에 대한 지진응답을 이용한 방법 : 등가단자유도계 응답법, 구조계 대표응답법

이 방법은 다자유도 구조물의 지진응답들로부터 구조계를 대표할 수 있는 단자유도의 지진응답의 산정이 가능하다면 기존의 단자유도계에 대한 지진손상도 방법을 이용하여 구조계의 지진손상도를 해석할 수 있다는 개념이다. 즉, 구조계를 대표하는 지진응답을 산정한 후, 이 지진응답을 기존의 지진손상도 추정법에 적용하면 구조계에 대한 지진손상도를 평가할 수 있다. 구조계의 지진응답을 산정하는 방법은 부록에 나타낸 바와 같이 등가 단자유도계 응답법^{(7),(20)}과 구조계 대표응답법^{(7),(20)}을 사용하였다.

등가단자유도계 응답법은 다자유도 구조물에 역삼각형 형태의 정적하중을 점진적으로 가하는 비탄성 정적해석을 통하여 등가단자유도계의 성질을 추정함으로써 다자유도 구조물을 등가단자유도계로 치환한다. 이 등가단자유도계 응답법에서 치환된 등가단자유도계의 지진하중에 대한 비탄성 동적해석 결과는 구조계를 대표하는 지진응답을 의미한다.

구조계 대표응답법은 다자유도 구조계의 지진에 대한 비탄성 동적응답을 산정하고, 이 결과로부터 부록에 나타낸 과정을 통하여 구조계를 대표하는 지진응답을 바로 구하는 방법이다. 이 방법은 다자유도 구조계의 지진응답으로부터 바로 구조계의 지진응답을 평가하므로 다자유도 구조계를 등가단자유도계로 치환하는 과정을 포함하는 등가단자유도계 방법보다 간편하고 정확한 방법이다.

본 연구에서는 등가단자유도계 응답법과 구조계 대표응답법을 이용하여 구한 구조계의 지진응답을 Park & Ang 방법에 적용하여 구조계에 대한 지진손상도를 평가하였다.

3.2 구조요소들의 손상지수를 이용한 방법 : 손상지수 조합법

구조계에 대한 지진응답을 이용하는 방법에서는 손상지수 그 자체가 구조계에 관한 값이지만, 구조요소들의 손상지수들로부터 구조계의 지진손상도를 평가하는 방법은 각 구조요소들에 대한 손상지수들을 조합하는 방법을 필요로 한다. 일반적으로 이 방법에서는 가중치를 적용하는 평균개념을 사용하여 구조계의 지진손상도를 평가하게 된다. 이 방법에서는 먼저 다자유도 구조물의 동적해석 수해를 통하여 각 구조요소의 비탄성 응답을 평가한 후, 이를 Park & Ang방법에 적용하여 각 구조요소(보, 기둥, 전단벽 등)들에 대한 손상지수를 평가한다. 각 구조요소의 손상지수로부터 구조계에 대한 지진손상도를 추정하는 방법은 Powell⁽⁵⁾이 다음과 같이 정의하였다.

$$DI_i = \frac{\sum_{i=1}^n w_i DI_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

여기서, DI_i 는 각 구조요소에 대한 손상지수의 값이고 이는 Park & Ang 방법을 사용하여 구할 수 있으며, DI_i 는 구조계에 대한 손상지수의 값이다. w_i 는 구조요소 i 에 대한 손상지수의 가중치를 나타낸다. 이 가중치는 구조계의 지진손상도에 대한 각 구조요소의 중요도를 반영하게 된다. 예를 들면, 고층구조물에서 아랫층 부분의 구조요소들의 지진손상도의 영향이 윗층 부분의 구조요소들의 영향보다 크게 된다. 또한, 일반적으로 기둥이 보보다는 구조계의 지진손상도에 미치는 영향이 크다. 또는, 손상이 심한 구조요소일수록 구조계의 지진손상에 더 많은 영향을 미치게 되므로 이를 가중치의 향으로써 반영한다.

식 (3)은 손상이 심한 구조요소가 전체구조계의 손상도에 미치는 영향이 크다는 가정하에서 각 구조요소의 손상지수를 가중함수로 사용한 방법이다. 본 연구에서는 식 (3)의 방법을 사용하였다.

$$DI_i = \frac{\sum_{i=1}^n DI_i^2}{\sum_{i=1}^n DI_i} \quad (3)$$

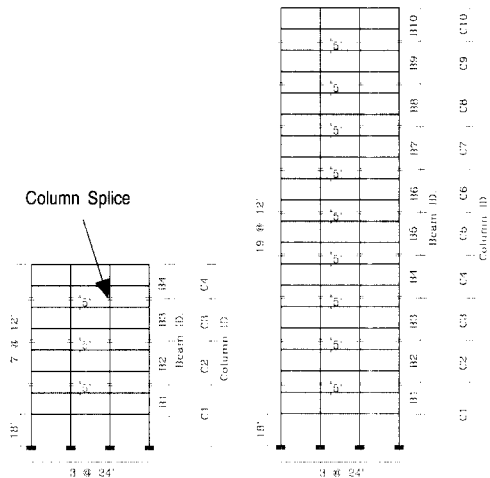
4. 예제 해석

4.1 예제 구조물과 입력지진

그림 1과 표 1에 나타난 바와 같이 UBC⁽⁹⁾ 규준에 따라서 설계된 4가지의 예제구조물^{(7),(20)}을 선정하였다. 이 예제구조물들은 강기둥-약보(strong column-weak beam, SCWB)와 약기둥-강보(weak column-strong beam, WCSB)의 설계개념에 따라 설계된 8층과 20층의 구조물이다. 예제구조물의 명칭은 강기둥-약보와 약기둥-강보에 따른 구분을 위하여 각각 SCWB과 WCSB를 명칭 앞부분에 사용하였고, 8층과

20층의 구분을 위하여 층의 수를 명칭 뒷부분에 사용하였다.

예를 들면 강기둥-약보 형식의 8층 구조물의 명칭은 SCWB8이다. 각 층의 집중질량은 모든 층에 대하여 0.8953 으로 가정하였다. 2차원 비선형 해석용 프로그램인 DRAIN2D+⁽⁸⁾를 예제구조물의 동적해석에 사용하였다. 구조물의 모형화는 양단의 끝 부분에 소성힌지를 가지는 일반적인 보-기둥요소를 사용하여 수행하였다. 구조물의 감쇠는 Rayleigh 감쇠를 적용하고, 첫번째 두 진동모드에 대한 모드감쇠계수는 0.02와 0.05를 적용하여 α 와 β 의 계수 값을 결정하였다. 8층 구조물에 대한 고유진동주기는 1.17초와 1.16초(SCWB8 과 WCSB8)이며, 20층 구조물에 대해서는 2.77초와 2.97 초(SCWB20 과 WCSB20)로 계산되었다.



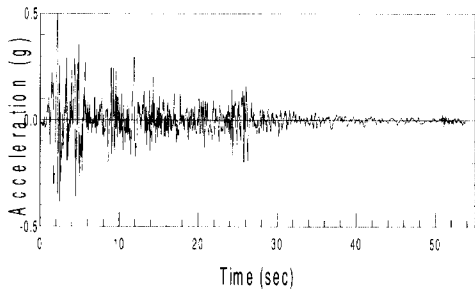
(a) 8-story structure (b) 20-story structure

그림 1 예제 구조물

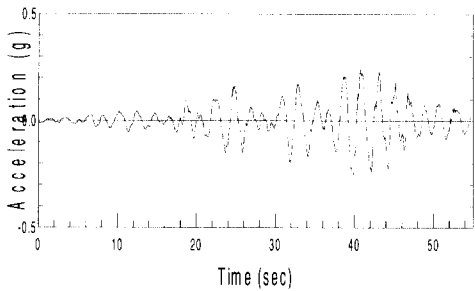
입력지진으로는 그림 2에 나타난 바와 같이 유효최대가속도(EPA)⁽¹⁰⁾가 0.4g가 되도록 스케일 조정된 El Centro 와 Mexico 지진을 사용하였다. 여기서 Mexico 지진은 일반적인 지진과는 달리 긴 주기 성분이 많으므로 유효최대가속도의 계산에 1초에서 5초대의 응답스펙트럼을 사용하였다.

표 1 예제구조물에 사용된 단면

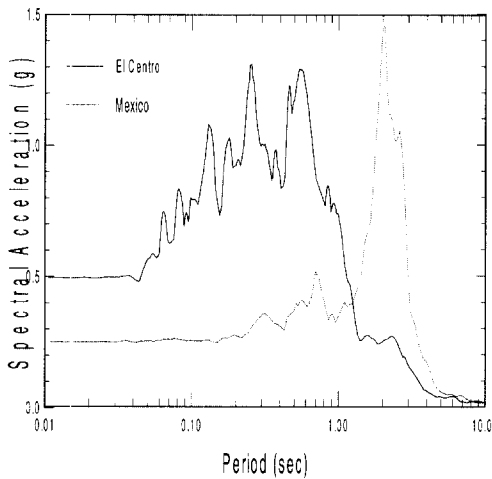
Member ID.	8-Story Frames		20-Story Frames	
	SCWB8	WCSB8	SCWB20	WCSB20
(a) Interior Columns				
C10	-	-	W27X84	W14X74
C9	-	-	W27X102	W14X90
C8	-	-	W30X116	W14X109
C7	-	-	W30X132	W14X132
C6	-	-	W36X135	W14X145
C5	-	-	W36X150	W14X159
C4	W24X55	W18X40	W36X160	W14X176
C3	W24X84	W18X60	W36X170	W14X193
C2	W24X94	W18X76	W36X182	W14X211
C1	W24X131	W21X122	W36X232	W14X283
(b) Exterior Columns				
C10	-	-	W14X74	W14X53
C9	-	-	W14X90	W14X68
C8	-	-	W14X109	W14X82
C7	-	-	W14X120	W14X99
C6	-	-	W14X132	W14X109
C5	-	-	W14X145	W14X120
C4	W14X48	W14X43	W14X159	W14X132
C3	W14X74	W14X48	W14X176	W14X145
C2	W14X90	W14X61	W14X193	W14X176
C1	W14X99	W14X82	W14X211	W14X193
(c) Girders				
C10	-	-	W24X62	W24X76
C9	-	-	W24X68	W27X94
C8	-	-	W24X76	W27X94
C7	-	-	W24X76	W30X108
C6	-	-	W27X84	W30X124
C5	-	-	W27X84	W30X124
C4	W18X40	W24X68	W27X94	W30X132
C3	W21X50	W24X76	W27X94	W30X132
C2	W24X55	W24X68	W27X102	W30X173
C1	W24X68	W24X102	W27X102	W30X173



(a) El Centro 지진 (남북방향 성분, 1940)



(b) Mexico 지진 (동서방향 성분, 1985)



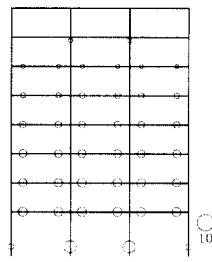
(c) 5%감쇠계수에 대한 탄성응답스펙트럼

그림 2 입력지진가속도 (EPA가 0.4 g가 되도록 스케일 조정)

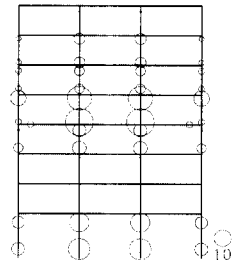
4.2 구조요소에 대한 지진손상도 해석

지진에 대한 구조요소들의 손상도 해석을 위해서는 먼저 각 구조요소의 소성힌지에서

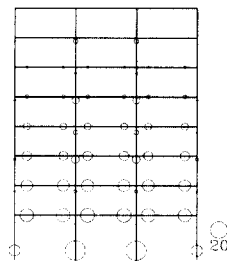
회전연성요구도와 비탄성 변형에너지를 비탄성 동적해석으로부터 구하여야 한다. 여기서 회전연성요구도는 소성힌지에서 항복회전에 대한 최대회전의 비로써 구한다. 비탄성 변형에너지는 다자유도계의 운동방정식을 상대변위에 대하여 적분한 지진에너지 방정식^{(7),(17),(20)}으로부터 구할 수 있다. 예제구조물에 대한 회전연성요구도와 비탄성 변형에너지의 결과를 그림 3~6에 나타내었다. 이 그림들에서 지진응답의 값은 오른쪽에 나타낸 기준값에 대하여 원의 상대적인 크기로 소성힌지에 나타내었다. 회전연성요구도의 분포는 Mexico 지진의 경우가 El Centro 지진의 약 2배 정도이지만, 비탄성 변형에너지의 경우는 약 10배 정도임을 알 수 있다. 이는 회전연성요구도는 최대응답만에 의한 값이지만 비탄성 변형에너지는 모든 응답에 의한 비탄성 변형에너지를 누적한 값이기 때문이다.



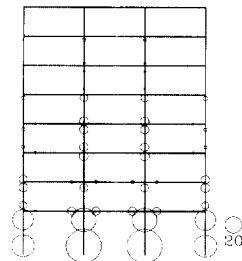
(a) SCWB8 (El Centro)



(b) WCSB8 (El Centro)

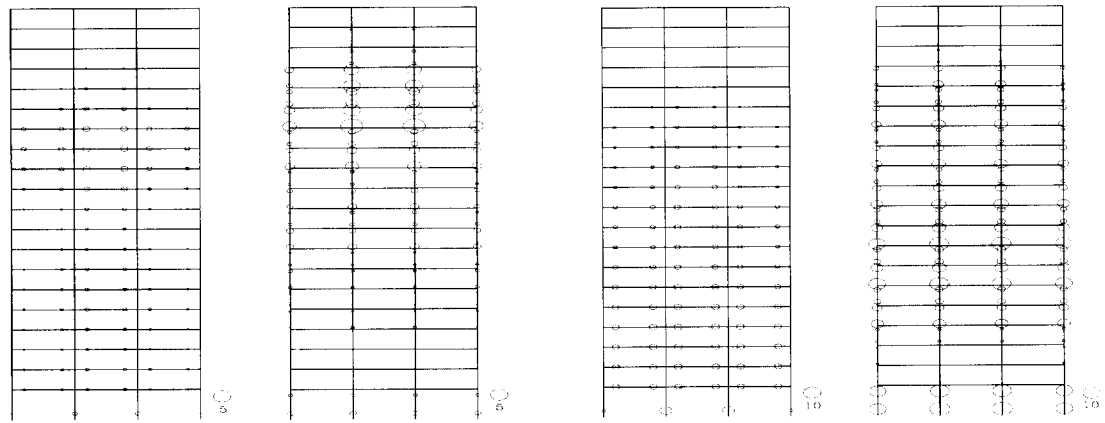


(c) SCWB8 (Mexico)



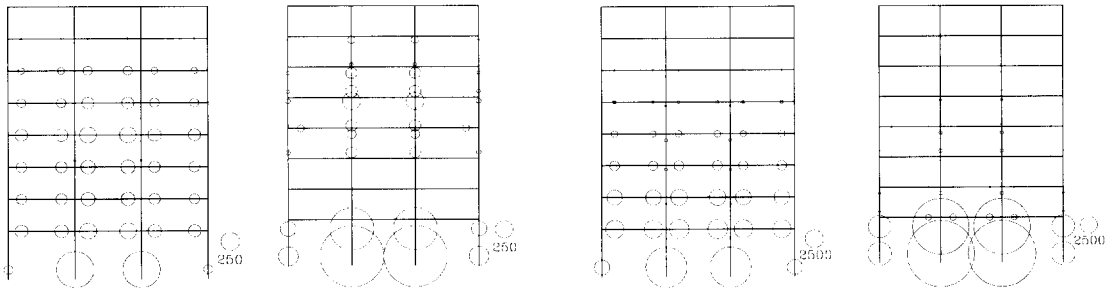
(d) WCSB8 (Mexico)

그림 3 8층 예제구조물에 대한 회전연성요구도의 분포



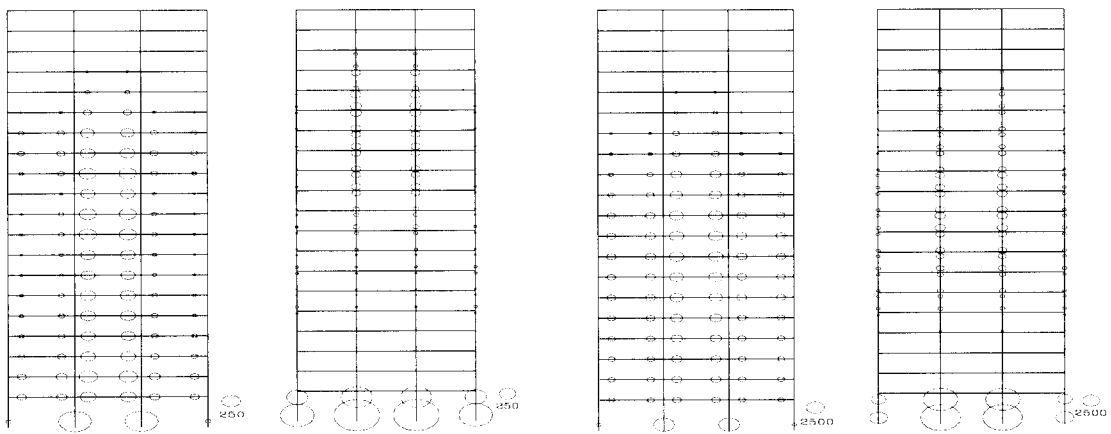
(a) SCWB20 (EI Centro) (b) WCSB20 (EI Centro) (c) SCWB20 (Mexico) (d) WCSB20 (Mexico)

그림 4 20층 예제구조물에 대한 회전연성요구도의 분포



(a) SCWB8 (EI Centro) (b) WCSB8 (EI Centro) (c) SCWB8 (Mexico) (d) WCSB8 (Mexico)

그림 5 8층 예제구조물에 대한 비탄성 변형에너지의 분포 (단위 : kips-in)



(a) SCWB20 (EI Centro) (b) WCSB20 (EI Centro) (c) SCWB20 (Mexico) (d) WCSB20 (Mexico)

그림 6 20층 예제구조물에 대한 비탄성 변형에너지의 분포 (단위 : kips-in)

구조요소에 대한 지진손상도 해석은 회전연성요구도와 비탄성 변형에너지의 결과를 Park & Ang 방법에 적용하여 수행하였다. 이 과정에서 구조요소들의 연성도 능력은 해석적인 방법으로는 구할 수 없고 실험적인 방법에 의해서만 평가 가능하다. 구조요소에 대하여 이론적으로 연성도 능력을 평가하기 위해서는 여러가지 단면에 대한 많은 실험결과를 이용하여 경험식을 만드는 방법이 대안이 될 수 있다. 이런 필요에 의하여 Daali와 Korol⁽⁴⁾이 I형 단면의 강재에 대하여 단조증가 하중재하 실험을 통하여 경험식을 제안하였으나, 이 경험식은 본 연구에 사용한 예제구조물의 적용에는 문제점이 있었기 때문에 적용치 못하였다. 이 경험식을 사용하여 예제구조물의 구조요소들에 대하여 연성도 능력을 평가한 결과, 이 경험식은 약기둥-약보 및 약기둥-강보에 따른 구조요소들의 연성도 능력의 경향을 제대로 반영하지 못하였다. 즉, 약기둥-강보의 구조물에서는 보의 연성도 능력이 기둥의 연성도 능력보다 큰 것이 일반적이나 반대의 경향이 나타났다. 그러므로 본 연구에 경험식을 적용하기 위해서는 경험식의 개선이 요구된다. 지금까지 이 분야의 연구자들은 연성도 능력을 균일적으로 가정하여 사용하는 것이 일반적이었다. 그러므로 본 연구에서는 구조요소들의 연성도 능력을 균일적으로 10이라고 가정하여 사용하였다. Park & Ang 방법에 의한 구조요소들의 손상지수를 그림 7~8에 나타내었다. 구조요소들의 연성도 능력을 균일적으로 가정하여 Park & Ang 방법에 적용하면, 분모항인 연성도 능력에서는 구조물의 형식에 따른 연성도 능력의 차이를 반영할 수 없지만 분자항인 회전연성요구도와 비탄성 변형에너지에서는 구조형식에 따른 지진요구도의 차이를 반영할 수 있다. 그러므로, 예제구조물의 지진손상도 해석결과가 실제구조물의 일반적인 지진손상도의 경향과 잘 일치한다. 즉, 강기둥-약보의 구조물에서는 보에 지진손상도가 집중되었고, 약기둥-강보의 구조물에서는 기둥에 지진

손상도가 집중되었다. 강기둥-약보 및 약기둥-강보의 구조형식에 따른 구조요소들의 연성도 능력의 차이를 합리적으로 반영할 수 있도록 경험식을 개선하여 지진손상도 해석에 적용한다면, 지진손상도를 보다 정확하게 평가할 수 있으리라고 판단된다.

Park & Ang 방법은 최대응답의 영향은 연성도 개념을 이용하여 반영하고, 반복적인 비탄성 거동에 의한 소성피로의 영향은 에너지 소산에 관한 항에 적절한 계수를 적용하여 반영한다. Park & Ang 방법에 의한 각 구조요소의 손상지수의 분포로부터 8층 예제구조물의 Mexico 지진에 의한 손상도는 비탄성 변형에너지의 영향이 연성요구도의 영향보다 많음을 그림 3~6에 나타난 결과와의 비교를 통하여 알 수 있고, El Centro 지진은 반대의 경향을 나타낸다.

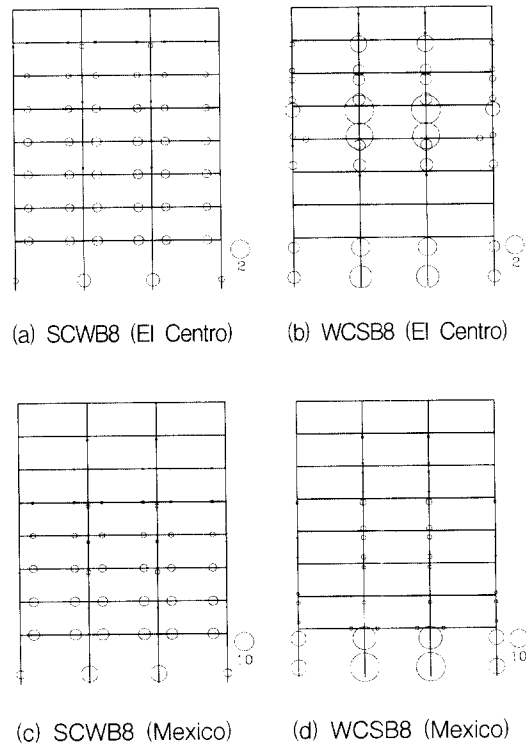
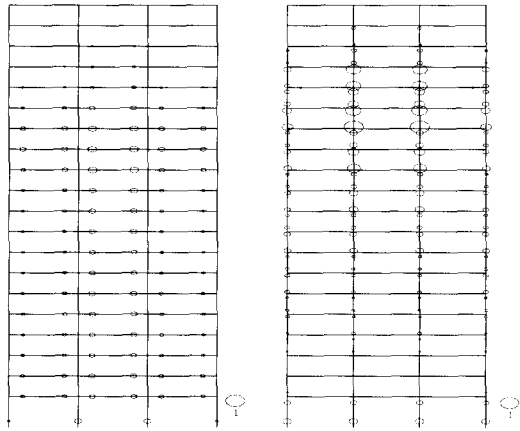
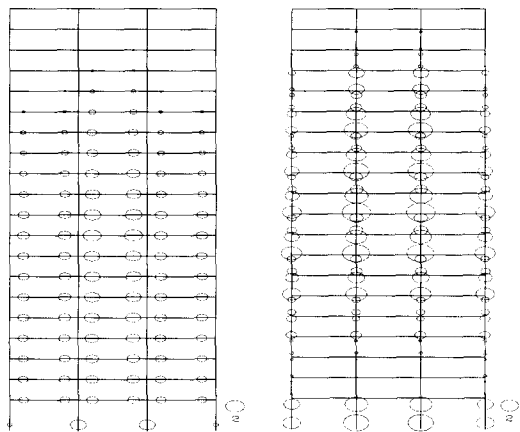


그림 7 Park & Ang 방법에 의한 8층 예제구조물의 구조요소에 대한 손상지수 (D_{PA})의 분포



(a) SCWB20 (EI Centro) (b) WCSB20 (EI Centro)



(c) SCWB20 (Mexico) (d) WCSB20 (Mexico)

그림 8 Park & Ang 방법에 의한 20층 예제구조물의 구조요소에 대한 손상지수 (D_{PA})의 분포

즉, 이는 구조물이 많은 횡수의 비탄성 거동을 할 경우에는 에너지에 관련된 손상함수의 항이 손상도 추정에 더 많은 영향을 미치고, 그 이외의 일반적인 지진하중과 같이 비탄성 거동의 횡수가 상대적으로 적은 경우에는 연성요구도에 관계된 손상함수가 손상도 추정을 지배함을 알 수 있다.

4.3 구조계에 대한 지진손상도 해석

구조계에 대한 지진손상도 해석은 부록에

나타낸 등가단자유도계 응답법과 구조계 대표 응답법을 이용하여 구조계의 시스템 지진응답을 평가한 후에 이를 기존의 단자유도계에 대한 손상도 추정방법에 적용하여 구조물의 손상도를 추정하는 방법과 구조물의 모든 구조요소들에 대하여 기존의 손상도 추정방법을 이용하여 구한 손상지수들로부터 구조계의 손상도를 추정하는 방법인 손상지수 조합법을 사용하였다. 손상지수 조합법은 현재까지 여러 연구자들^{(2),(3),(4)}에 의해 구조계의 지진손상을 평가하는데 가장 널리 사용되는 방법이므로 등가단자유도계 응답법과 구조계 대표응답법의 결과의 유용성 및 정확성을 비교하는데 사용하였다.

등가단자유도계 응답법에서 예제구조물들에 대응되는 등가단자유도계의 선형 및 비선형 성질은 부록 A.1의 과정을 통하여 구하였으며 이 결과를 표 2에 나타내었다. 등가단자유도계 응답법은 표 2에 나타낸 선형 및 비선형 성질을 가진 등가단자유도계의 비탄성 동적해석에 의하여 구조물의 시스템 지진응답을 산정한다. 등가단자유도계 응답법에 의한 시스템 연성요구도와 비탄성 변형에너지의 결과를 표 3에 나타내었다. 구조계 대표응답법에서는 다자유도 구조물의 비탄성 동적해석으로부터 시스템 지진응답을 바로 평가한다. 구조계 대표응답법에 의한 시스템 연성요구도와 비탄성 변형에너지의 결과를 표 4에 나타내었다. 표 3과 표 4의 결과로부터 등가단자유도계 응답법과 구조계 대표응답법에 의한 시스템 연성요구도와 비탄성 변형에너지의 결과는 유사함을 알 수 있다. 일반적으로 구조물의 구조계에 대한 시스템 연성도는 구조요소에 관한 연성도의 $1/3 \sim 1/2$ 의 값을 가진다.^{(7),(11),(20)} 또한, 강기둥-약보의 구조물이 약기둥-강보의 구조물에 비하여 연성도 능력이 우수하다.⁽¹²⁾ 위의 설명을 근거로 하여 구조요소의 연성도 능력은 10이라고 가정하여 사용하였기 때문에 전체구조계의 연성도 능력은 강기둥-약보의 구조물은 구조요소들의 $1/2$ 값인 5, 약기둥-강보의 구조물은

구조요소들의 1/3 값인 3.3으로 가정하여 사용하였다. 일반적으로 강기둥-약보 및 약기둥-강보에 따른 구조계의 연성도 능력의 차이

예제구조물의 방법에 따른 구조계에 대한 지진손상도 추정결과를 표 5~6에 나타내었다. 등가단자유도계 응답법, 구조계 대표응답법과

표 2 등가단자유도계 응답법에 의한 등가단자유도계의 성질

등가단자유도계의 성질	예제 구조물			
	SCWB8	WCSB8	SCWB20	WCSB20
등가질량, m ($kips - sec^2/in.$)	5.934 (7.162)	5.985 (7.162)	13.854 (17.91)	13.711 (17.91)
감쇠계수, ξ	0.020	0.020	0.020	0.020
탄성감성 k_e ($kips/in$)	171.7	176.9	71.4	61.5
주기 (sec)	1.17 (1.17)	1.16 (1.16)	2.77 (2.77)	2.97 (2.97)
항복력, F_y ($kips$)	298	318	535	560
변형률 경화비, p_1	0.029	0.033	0.033	0.040

참고 : 괄호안의 질량과 주기는 다자유도계에 관한 값이다. ($1 kips = 453.6 kg$, $1 in = 2.54 cm$)

표 3 등가단자유도계 응답법에 의한 구조계 연성요구도 및 비탄성 변형에너지

예제구조물	El Centro 지진		Mexico 지진	
	구조계 연성요구도	비탄성 변형 에너지($kips-in$)	구조계 연성요구도	비탄성 변형 에너지($kips-in$)
SCWB8	4.4	6602	9.2	63124
WCSB8	4.0	6866	8.6	62022
SCWB20	1.7	10601	3.4	132250
WCSB20	1.8	9370	3.3	126580

표 4 구조계 대표응답법에 의한 구조계 연성요구도 및 비탄성 변형에너지

예제구조물	El Centro 지진		Mexico 지진	
	구조계 연성요구도	비탄성 변형 에너지($kips-in$)	구조계 연성요구도	비탄성 변형 에너지($kips-in$)
SCWB8	3.8	5604	9.0	66076
WCSB8	3.7	5660	8.9	64264
SCWB20	1.5	8772	2.8	119030
WCSB20	1.3	7575	2.9	106590

를 명확하게 분석하는 것은 어렵기 때문에 위와 같은 배경에 의하여 가정치를 사용하였다. 강기둥-약보 및 약기둥-강보의 구조형식에 따른 구조계의 연성도 능력의 합리적인 평가방법이 개발된다면 보다 정확한 구조계의 지진손상도 해석을 수행하는 데 사용될 수 있으리라 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 방법에 따른 지진손상도의 비교, 분석에 주안점을 둔다.

손상지수 조합법은 강기둥-약보 예제구조물에 대한 지진손상도를 약기둥-강도 예제구조물에 대한 지진손상도 보다 작게 평가하고 있다. 이 결과는 그림 5~6에 나타난 구조요소에 대한 손상도 추정결과와 경향과 잘 일치하며, 약기둥-강보의 구조물이 강기둥-약보의 구조물보다 지진손상을 입기 쉽다는 일반적인 견해와도 일치한다. 방법에 따른 구조계의 손상지수의 차이를 비교하기 위하여 표 5~6의 결과를 그

림 9에 나타내었다. 이 그림에서 대각선의 점선에 가까울수록 결과가 서로 비슷하다는 것을 나타내므로, 등가단자유도계 응답법과 구조계 대표응답법이 손상지수 조합법보다 전반적으로 지진손상도를 약간 크게 평가하고 있지만 모든 방법이 서로 비슷한 분포의 결과를 제시하고 있음을 알 수 있다.

또한, 구조계 대표응답법이 등가단자유도계 응답법보다 손상지수 조합법의 결과와 보다 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

손상지수 조합법은 구조요소들의 손상지수 값들을 가중합수로 이용하여 구조계의 손상도를 평가하기 때문에, 지진손상이 특정한 하나의 구조요소에 국한적으로 발생한다고 가정한다면 이 값이 구조계에 대한 손상지수 값이 되기 때문에 소수의 구조요소에 집중적인 손상이 발생하는 경우에는 구조계의 지진손상도를 과대평가할 수 있는 단점이 있다. 그러나, 내진설계가 적절히 수행된 경우의 구조물은 극단적인 지진손상의 집중현상은 발생하지 않

표 5 각 방법에 의한 8층 예제구조물의 구조계 손상지수 (D_{PI})

입력지진	구조계에 대한 손상지수					
	등가단자유도계 응답법		구조계 대표응답법		손상지수 조합법	
	SCWB8	WCSB8	SCWB8	WCSB8	SCWB8	WCSB8
El Centro 지진	1.263	1.758	1.085	1.567	0.833	1.663
Mexico 지진	5.501	7.537	5.635	7.754	4.377	7.302

표 6 각 방법에 의한 20층 예제구조물의 구조계 손상지수 (D_{PI})

입력지진	구조계에 대한 손상지수					
	등가단자유도계 응답법		구조계 대표응답법		손상지수 조합법	
	SCWB20	WCSB20	SCWB20	WCSB20	SCWB20	WCSB20
El Centro 지진	0.419	0.629	0.375	0.472	0.308	0.457
Mexico 지진	1.670	2.128	1.600	1.978	1.260	1.754

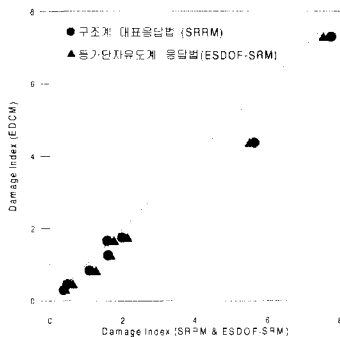


그림 9 방법에 따른 구조계에 대한 손상지수의 비교 (EDCM : 손상지수 조합법, SRM : 구조계 대표응답법, ESDOF-SRM : 등가단자유도계 응답법)

을 것이므로 손상지수 조합법의 개념은 전반적으로 합리적이라고 할 수 있다. 등가단자유도계 응답법과 구조계 대표응답법은 손상지수 조합법과는 달리 모든 부재의 비탄성 동적해석 결과를 필요로 하지 않고 시스템의 지진응답 결과만을 이용하므로 계산시간 및 작업내용이 간편한 장점이 있다. 또한, 구조계 대표응답법이 등가단자유도계 응답법보다 구조물의 시스템 지진응답을 정확하고 간편하게 구할 수 있는 방법이기 때문에^{(7),(20)} 구조계의 지진손상도 해석에 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 구조계 대표응답법의 사용이 효과적이라고 할 수 있다.

연성도 능력은 실험적으로만 평가 가능하기 때문에 본 연구에서 구조요소 및 구조계의 연성도 능력을 문헌에 나온 연구결과를 토대로 가정하여 사용하였는데, 보다 정확한 지진손상도 해석을 위해서는 연성도 능력을 보다 합리적으로 평가하는 방법의 개발이 요구된다. 구조요소에 대한 연성도 능력은 구조요소에 대한 많은 실험결과로부터 경험식을 산출하여 사용할 수 있다.

또한, 구조요소들의 연성도 능력으로부터 구조계의 대한 연성도 능력을 산출하는 방법의 개발도 중요하다고 판단된다. 예를 들면, 구조계에 대한 연성도 능력을 구조요소들의 연성도 능력으로부터 산술평균적인 개념을 도입하여 구한다면 구조형식의 차이에 관계없이 비슷한 값이 구해질 것이다. 그러나, 실제적인 구조계의 연성도 능력은 강기둥-약보의 구조물이 약기둥-강보의 구조물보다 우수하다.

5. 결 론

본 논문에서는 구조요소 및 구조계에 대한 지진손상도 해석방법을 연구하였다. 구조요소에 대한 지진손상도 해석은 단자유도계와 구조요소에 바로 적용이 가능한 연성도 개념과 에너지 개념을 선형조합한 기존의 방법인 Park & Ang 방법을 예제해석을 통하여 비교하였다. 예제해석을 통하여 Mexico 지진과 같이 구조물에 많은 횡수의 비탄성 거동을 유발할 경우에는 에너지에 관련된 손상함수가 손상도에 지배적인 영향을 미치고, 그 이외의 일반적인 지진하중을 대표할 수 있는 El Centro 지진과 같이 상대적으로 적은 횡수의 비탄성 거동을 유발하는 경우에는 연성요구도에 관계된 손상함수가 손상도를 지배적인 영향을 미침을 알 수 있다.

기존의 지진손상도 추정법의 대부분은 단자유도계 혹은 구조요소에 대한 응답 결과로부터 지진손상도를 추정하게 하므로, 실제의 다

자유도 구조물에 대한 구조계의 지진손상도 해석에 이 방법들을 바로 적용할 수는 없다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 구조계 대표응답법과 등가단자유도계 응답법을 사용하였으며, 이 방법들의 유용성 및 정확성을 평가하기 위하여 손상지수 조합법과 예제해석을 통하여 비교하였다. 등가단자유도계 응답법과 구조계 대표응답법이 손상지수 조합법보다 전반적으로 지진손상도를 약간 크게 평가하고 있지만 모든 방법이 서로 비슷한 분포의 결과를 제시하고 있음을 알 수 있다. 또한, 구조계 대표응답법이 등가단자유도계 응답법보다 손상지수 조합법의 결과와 보다 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 구조계 대표응답법과 등가단자유도계 응답법은 각 구조요소들에 대한 지진손상도의 평가를 수행하지 않고도 구조계의 지진응답으로부터 바로 구조계에 대한 지진손상도를 추정할 수 있으므로 간편하고 효율적인 방법이다. 또한, 구조계 대표응답법이 등가단자유도계 응답법보다 구조계에 대한 지진응답을 정확하고 간편하게 구할 수 있는 방법이기 때문에 구조계의 지진손상도 해석에 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 구조계 대표응답법의 사용이 효과적이라고 할 수 있다.

본 연구에서 구조요소 및 구조계의 연성도 능력을 문헌에 나온 연구결과를 토대로 가정하여 사용하였는데, 보다 정확한 지진손상도 해석을 위해서는 연성도 능력을 보다 합리적으로 평가하는 방법의 개발이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Cosenza, C., Manfredi, G., and Ramasco, R., "The use of damage functionals in earthquake engineering: a comparison between different methods," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1993, Vol. 22, pp. 855-968.
2. Park, Y. J., and Ang, A. H.-S., "Mechanistic seismic damage model for

- reinforced concrete," *J. Struct. Eng ASCE*, 1985, Vol. 111, pp. 722-739.
3. Fajfar, P., and Gaspersic, P., "The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1996, Vol. 25, pp. 31-46.
 4. Daali, M. L., and Korol, R. M., "Adequate ductility in steel beams under earthquake-type loading," *Engineering Structures*, 1996, Vol. 18 No.2, pp. 179-189.
 5. Powell, G. H., and Allahabadi, R. "Seismic damage prediction by deterministic method: concepts and procedures," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1988, Vol. 16, pp. 719-734.
 6. Baik, S. W., Lee, D. G., and Krawinkler, H., "A simplified model for seismic response prediction of steel frame structures," *Proc. 9th World Conf. Earthquake Engng.* Tokyo, Kyoto, 1988, Vol. 5, pp. 375-380.
 7. Lee, D. G., Song, J. K., and Yun, C. B., "Estimation of system-level ductility demands for multistory structures," *Engineering Structures*, 1997, Vol. 19, No. 12, pp. 1025-1035.
 8. 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.
 9. *Uniform Building Code (UBC)*, Int. Conf. of Building Officials (ICBO), Whittier, Calif., 1994.
 10. *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings*, ATC-3-06, Applied Technology Council, Palo Alto, Calif., 1984.
 11. Newmark, N. M., and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engng. Res. Inst., El Cerrito, Calif., 1982.
 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, Vol. 119. No. 6, pp. 1866-1884.
 13. Kanaan, A. E., and Powell, G. H., "DRAIN-2D - A general purpose computer program for inelastic dynamic response of plane structures," *Report No. UCB/EERC-73/06*, Univ. of California, Berkeley, 1973.
 14. Walpole, W. R., and Shepherd, R., "Elasto-plastic seismic response of reinforced concrete frame," *J. Struct. Div., ASCE* 1969, Vol. 95, (ST10), pp. 2031-2055.
 15. Uang, C. M., "Establishing R (or R_w) and C_d factors for building seismic provisions," *J. Struct. Engng, ASCE* 1991, Vol. 117, No.1, pp. 19-28.
 16. Newmark, N. M., and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engng. Res. Inst., El Cerrito, Calif., 1982.
 17. Uang, C. M., and Bertero, V. V., "Evaluation of seismic energy in structures," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1990, Vol. 19, pp. 77-90.
 18. Rodriguez, M., "A measure of the capacity of earthquake ground motions to damage structures," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1994, Vol. 23, pp. 627-643.
 19. Mahin, S. A., and Lin, J., "Construction of inelastic response spectra for single degree of freedom systems," *Report No. UCB/EERC-83/17*, Univ. of California, Berkeley, 1983.
 20. 이동근, 송종걸, 윤정방, "지진에 대한 고층구조물의 시스템 연성요구도 평가방법", 대한토목학회 논문집, 제17권 제I-2호, 1997, pp. 245~257.

21. 송종걸, 윤정방, 이동근, “지진에 대한 강 구조물의 피로손상도 추정법”, 한국강구조 학회 논문집, 제9권 제1호, 1997, pp. 95~105.
22. 송종걸, 이동근, 윤정방, “대형 강구조물의 지진손상도 해석”, 한국지진공학회 학술발 표회 논문집, 제1권 제1호, 1997, pp. 199-206.

부록 : 구조계에 대한 지진응답 산정 방법

다자유도 구조물에서 구조계를 대표하는 단자유도의 지진응답은 다자유도계의 응답으로부터 등가단자유도의 응답이 유도된다면 효과적으로 평가될 수 있다. 지진하중을 받는 다자유도 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{R}(\mathbf{X}) = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{x}_g \quad (\text{A.1})$$

여기서 \mathbf{X} 는 지반에 대한 상대변위벡터, \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{C} 는 감쇠행렬, $\mathbf{R}(\mathbf{X})$ 는 저항력 벡터, 그리고 $\mathbf{1}$ 은 구조물의 자유도에 대하여 입력지반가속도에 연관된 단위벡터이다.

구조물의 거동을 다음과 같은 형태로 근사적으로 가정한다.

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\Psi}u \quad (\text{A.2})$$

여기서 $\boldsymbol{\Psi}$ 는 고층구조물의 변형형상을 나타내는 상수 벡터이고, u 는 구조시스템을 대표하는 변위이다. 식 (A.2)를 식 (A.1)에 대입하고 운동방정식의 양변에 $\boldsymbol{\Psi}^T$ 를 곱해주면, 등가단자유도 방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + r(u) = -l\ddot{x}_g \quad (\text{A.3})$$

여기서, $m = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Psi}$, $c = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\Psi}$, $l = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M} \mathbf{1}$, 그리고 $r(u)$ 는 등가저항력으로서 다음과 같이 정의된다.

$$r(u) = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{R}(\mathbf{X}) \quad (\text{A.4})$$

아래와 같은 조건을 만족하도록 형상벡터 $\boldsymbol{\Psi}$ 를 정규화 한다.

$$\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M} \mathbf{1} \quad (\text{A.5})$$

위의 과정에 의하여 식 (A.3)의 지진하중계

수 l 은 m 과 같게 된다.

식 (A.5)을 이용하고 식 (A.2)에 $\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M}$ 를 곱하면, 구조계를 대표하는 변위 u 를 근사적으로 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$u(t) = \frac{\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M} \mathbf{X}(t)}{\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M} \mathbf{1}} \quad (\text{A.6})$$

위의 설명을 근거로 하여 구조계의 지진응답 산정을 위한 다음과 같은 두 가지 방법이 있다.

A.1 등가단자유도계 응답법

이 방법에서는 먼저, 다자유도계 구조물에 대하여 등가단자유도계를 유도한다. 그런 다음 유도된 등가단자유도계를 입력지진에 대하여 동적해석을 수행한다. 이 동적해석결과로부터 시스템 연성요구도를 평가한다. 등가단자유도계의 성질은 삼각형 분포, UBC 및 ATC에 정의된 등가정적하중분포와 같은 적절한 수직분포의 점진적으로 단조증가되는 하중에 의한 준정적 해석으로부터 구해진 변형형상을 이용하여 구한다. 힘-변위 관계를 구하기 위하여 등가단자유도 변위 u 은 식 (A.5)과 식 (A.6)을 이용하여 구해진 정규화된 정적변형으로부터 평가한다. 반면에 등가저항력 $r(u)$ 는 식 (A.4)에 의하여 결정된다. 힘-변위 관계인 $u-r(u)$ 의 비탄성 관계는 bilinear로 근사화되고, 탄성구간의 강성 k_e , 항복력 F_y 와 변형을 경화비 (strain hardening ratio) p_1 은 근사화된 bilinear 관계로부터 결정된다. 마지막으로, 등가단자유도계의 비탄성 동적응답은 지진하중에 의하여 구해지며, 이로부터 $u(t)$ 와 $r(u(t))$ 의 시간이력으로부터 구조계에 대한 연성요구도 및 비탄성 변형에너지를 평가할 수 있다.

A.2 구조계 대표응답법

이 방법에서 시스템 연성요구도의 평가를

위한 힘-변위 관계는 다자유도계의 동적 응답을 기반으로 하여 구해진다. 일반적으로 정형 구조물의 대부분의 동적응답은 구조물의 첫번째 진동모드형상에 의해 지배된다. 그러므로, 이 방법에서는 식 (A.2)에서의 형상 벡터 ψ 를 근사적으로 식 (A.5)에 의하여 정규화된 다자유도계의 첫번째 모드형상 ϕ_1 로 취한다. 그러면 구조시스템의 대표적 변위 $u(t)$ 는 다자유도계의 비탄성 동적해석으로부터 구해진 다자유도 응답벡터 $\mathbf{X}(t)$ 에 관한 첫번째 모

드변위가 된다.

$$u(t) = \frac{\phi_1^T \mathbf{M} \mathbf{X}(t)}{\phi_1^T \mathbf{M} \mathbf{1}} \quad (\text{A.7})$$

$u(t)$ 와 $r(u(t))$ 의 시간 이력으로부터 $r(u)$ 와 u 의 관계를 bilinear 관계로 근사적으로 나타낼 수 있고, 이로부터 구조계에 대한 연성요구도 및 비탄성 변형에너지를 평가할 수 있다.