

지진 하중을 받는 평면 비정형 건물의 편심과 손상도의 상관관계에 대한 연구

A Study on the Relationship between the Eccentricity and the Level of Damage in the Seismic Response of Buildings with Plan Irregularities

정성훈¹⁾ · 이광호²⁾

Jeong, Seoung Hoon · Lee, Kwang Ho

국문 요약 >> 비정형 평면을 가진 건물의 추가적인 손상의 원인이 되는 비틀림과 비정형성의 척도인 편심과의 관계에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔으나 손상도와 편심의 직접적인 관계에 대한 연구는 수행된 적이 거의 없다. 본 연구에서는 비정형 평면을 가진 건물의 복잡한 지진 응답에 적용할 수 있는 3차원 손상도 계수를 이용하여 건물의 손상도와 편심에 대한 정량적인 관계를 분석하였다. 이를 통해 건물의 편심이 커지면 최대변위는 줄어들지만 비틀림 거동이 증가하여, 손상의 집중으로 인해 전반적인 손상도 계수가 증가함이 관찰되었다. 또한, 2차원 주기가 비슷한 경우에는, 건물의 길이가 최대변위와 최대 비틀림에 미치는 영향이 작으며 이로 인해 전체 손상도 계수에 그 영향이 미미한 것으로 관찰되었다. 해석 결과를 바탕으로 중약진 지역에서 편심의 크기가 10%, 20%, 30%인 단층 건물은 편심이 없는 건물에 비해서 각각 평균 3~5%, 13~18%, 33~47% 정도의 손상도 증가가 있을 것으로 분석하였다. 이와 같은 편심-손상도 관계는 비정형 평면을 가진 건물의 내진 설계에 있어서 기본 구조 계획 수립과 내진 성능 평가에 유용한 자료가 될 것으로 생각된다.

주요어 비정형 평면, 지진거동, 편심, 손상도 계수

ABSTRACT >> Most previous research on the seismic response of structures with plan irregularities have focused on the relationship between the eccentricity and the amount of torsion. This approach cannot provide the direct relationship between the irregularity and the damage. Therefore, an investigation on the relationship between the eccentricities of buildings with plan irregularities and the damage index was performed. Inelastic dynamic time-history analyses were performed on one-story buildings with various eccentricities. For the damage assessment, a 3D damage index was adopted to reflect the effect of the bi-directional response and torsion. Based on the analysis results, buildings with eccentricities of 10%, 20% and 30% will suffer 3~5%, 13~18%, and 33~47% more damage than their regular counterparts, respectively.

Key words Plan irregularity, Earthquake response, Eccentricity, Damage index

1. 서론

지진에 의한 피해사례 조사 및 해석적인 연구를 통해서 평면 비정형성을 가진 건물이 유사한 조건의 정형 건물보다 더 높은 손상 정도를 보인다는 사실이 확인되어 왔다. 이를 설계에 반영하기 위해서, 여러 나라의 내진설계 기준에는

건물 평면의 비정형성을 제한하거나 비정형 건물에 대해서 보다 정밀한 해석을 수행하도록 하는 조항들이 존재한다.^{(1),(2)}

평면 비정형성으로 인한 추가적인 손상의 원인은 다음과 같이 정리될 수 있다. 건물의 비틀림 거동은 평면상에서 횡강성이 상대적으로 낮은 부분의 횡변위를 증가시키게 되므로 이 부분에 손상이 집중된다. 이와 같은 지진 응답을 보이는 건물은 손상이 평면상에 고르게 분포된 건물에 비해서 구조적으로 불리하다.

비정형 평면을 가진 건물의 추가적인 손상의 원인이 되는 비틀림과 비정형성의 척도인 편심 (질량과 강성중심 간의 이격거리)과의 관계에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다.^{(3),(4)} 하지만 손상도와 편심의 직접적인 관계에 대한 연구는 수행

¹⁾ 정회원·인하대학교 건축학부, 조교수
(교신저자: jeong@inha.ac.kr)

²⁾ 정회원·인하대학교 건축학부, 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 2. 22 / 수정일 2010. 5. 18 / 게재확정일 : 2010. 5. 18)

된 적이 거의 없다. 이는 관련 연구 분야에서 건물의 3차원 거동에 적용할 수 있는 손상도 계수의 개발 실적이 매우 저조했기 때문이다.

이 논문에서는 비정형 평면을 가진 건물의 복잡한 지진 응답에 적용할 수 있는 3차원 손상도 계수를 이용하여 건물의 손상도와 편심에 대한 정량적인 관계를 분석하는 것을 연구의 목표로 한다.

2. 3차원 손상도 계수

비정형 평면을 가진 건물의 지진 응답은 양방향 변위와 비틀림의 상호관계 속에서 정해진다. 비틀림의 영향으로 인하여 부재 손상의 정도가 평면상의 위치에 따라 다르며 이와 동시에 주요 구조부재들은 양방향 거동을 보인다. 따라서 3차원 손상도 계수의 적용이 필수적이다. 이 논문에서 사용한 손상도 계수의 원리와 계산 방법은 다음의 소절에 설명되어 있다.

2.1 평면골조분해

비틀림의 영향으로 인하여 부재 손상의 정도가 평면상의 위치에 따라 다르다. 이를 고려하기 위하여 이 연구에서는 3차원 건물을 골조선을 따라 평면적으로 분해하여 손상도 분석을 수행하는 방법을 적용하였다. 건물의 횡저항 구조요소의 기본 단위를 평면 골조로 가정하여, 그림 1과 같이 전체 구조물을 분해하였다. 여기서, 평면 골조 분해는 원래 구조물을 물리적으로 분리하는 것이 아니라 손상도 측정을 위한 기초 관찰 범위를 횡저항 요소의 기본 단위인 평면 골조로 한정하는 방법이다. 이는 Park and Ang⁽⁵⁾이 제안한 손상

도 계수의 계산에서 기동과 보와 같은 철근콘크리트 부재를 구조물의 기본 단위로 가정하고 이들을 손상도 측정을 위한 기초 관찰 범위로 하는 것과 같이 요소단위의 개념적인 분해로 볼 수 있다.

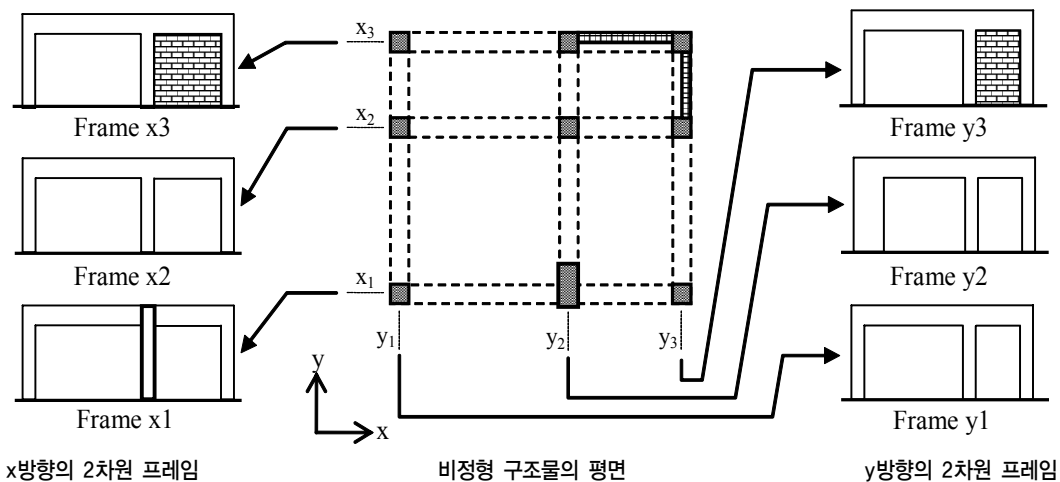
2.2 국부손상도 계수

건물의 손상도를 전체손상도계수로 볼 때 평면골조에 대한 손상도는 국부손상도계수로 정의된다. 국부손상도계수의 산정에 있어서 고려해야 할 점은 평면골조의 거동이 2차원적인 면내활동으로만 한정되지 않는다는 것이다. 즉, 평면골조는 3차원 건물의 한 부분으로서 비틀림과 양방향 지진하중에 의해 면외응답을 보이고, 골조선에 직각으로 연결된 부재로부터 하중을 받기도 한다.

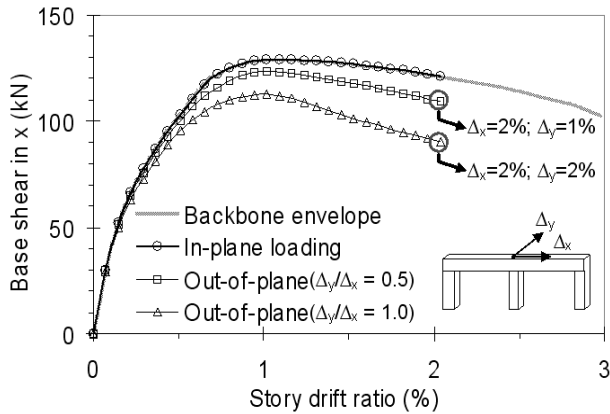
평면골조의 거동에 있어서 면외 응답의 영향을 분석하기 위하여, 면외 변위의 크기 ($\Delta_y/\Delta_x = 0; 0.5; 1.0$)에 따른 평면 RC골조의 힘-변위 곡선의 변화를 분석하였다 (그림 2).

그림 2로부터 면외 변위가 증가할수록 힘-변위 관계곡선의 강도가 감소됨을 관찰할 수 있다. 따라서 평면골조 능력곡선의 강도감소는 면외응답에 의한 손상의 척도가 될 수 있다. 또한 반복하중의 효과에 의해서도 능력곡선의 강도감소가 발생할 수 있다. 따라서 이력곡선의 주어진 변위에서, 평면골조의 2차원 기준 포락선 (2D Backbone Envelope)으로부터의 강도감소는 평면프레임의 면외 응답 (Out-of-plane Response)과 반복하중의 복합된 영향을 반영할 수 있다.

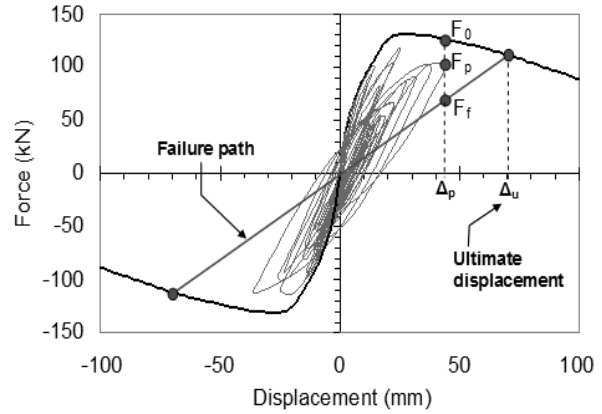
이상의 논의로부터 평면골조의 손상도 계수는 식 (1)과 같이 변위의 피크값 (Δ_p)과 2차원 기준 포락선으로부터의 강도감소 (F_0-F_p/F_0-F_f)의 조합으로 정의하였다.



〈그림 1〉 비정형 구조물과 2차원 프레임의 평면



〈그림 2〉 면외작용의 존재여부에 따른 응답 비교



〈그림 3〉 국부손상지표에 대한 변수

$$D = \begin{cases} \frac{\Delta_p}{\Delta_u} + (1 - \frac{\Delta_p}{\Delta_u}) \times \frac{F_0 - F_p}{F_0 - F_f} & \text{for } \Delta_p \leq \Delta_u \\ \frac{\Delta_p}{\Delta_u} & \text{for } \Delta_p > \Delta_u \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에 사용된 변수들은 그림 3의 양방향 반복하중을 받는 예제 RC 골조의 하중-변위관계에 표현되어있다. Δ_p 와 Δ_u 는 각각 피크변위 (Peak Response)와 극한변위이며 피크 변위 (Δ_p)가 반드시 최대 응답은 아니다. 여기서, 최대 변위 대신 변위의 피크값 (Δ_p)을 사용한 이유는 변위와 강도의 조합으로 산정되는 손상도 계수 (D)는 변위의 최대값에서 항상 손상도 계수의 최대값에 이르지 않는기 때문이다. 따라서 골조 손상도 계수 (D)는 최대값이 될 수 있는 여러 개의 유력한 피크 변위에서 산정되어야 한다. 주어진 피크 변위 (Δ_p)에서 F_0 와 F_p 는 각각 2차원 기준 포락선과 반복 응답곡선에서의 하중 값이다. $F_0 - F_p$ 는 면외 거동 및 반복 하중 효과에 의한 강도감소를 나타내며, F_f 는 해당 피크 변위 (Δ_p)에서의 파괴강도이다. 파괴강도는 원점과 극한변위 (Δ_u)를 연결하는 변위-강도의 선형관계인 failure path 상에서 구할 수 있다. 이 방법은 여러 연구자들^{(6),(7)}에 의해 RC부재의 파괴강도 예측에 상계 (Upper-bound) 값으로 사용되어져 왔으며, 할선강성 손상지표^{(8),(9)}에 사용되어진 극한강성과 유사한 개념이다.

2.3 전체 손상도 계수

이상의 과정을 통해 산정된 평면 골조의 손상도를 국부 손상도로 가정하고 이를 합해서 건물 전체에 대한 손상도를 계산하는 과정이 다음의 소절에 설명되어 있다.

2.3.1 기본원리

전체 손상도 계수는 2.2절에서 정의된 국부 손상도 계수를 가중평균 (Weighted Average)하여 계산하며 이 과정에

서 다음과 같은 원칙이 적용되었다.

- (a) 심각하게 손상된 국부 부재에 가중치를 둔다.
국부 부재의 심각한 손상은 전반적인 구조물의 붕괴 가능성을 증가시키므로 이에 가중치를 두는 것은 타당한 가정이라고 볼 수 있다. 이는 Park et al.⁽¹⁰⁾의 손상도 계수에 대한 연구에서도 사용되었다.
- (b) 가중치 (Weighting factor)의 산정에 국부 부재에 의해 지지되는 중력하중을 사용한다.
구조물의 궁극적인 목적은 중력하중을 지지해야 한다는 개념에 근거하여, 국부 부재에 의해 지지되는 중력하중을 가중치의 산정에 이용하는 것은 합리적이며 편리한 가정으로 볼 수 있다. 이 가정은 Bracci et al.⁽⁷⁾의 연구에서와 같이 가중평균에 의한 전체 손상도 계수 산정 방법에 사용되어 왔다.

이상의 가정을 바탕으로 이 연구에서는 국부 가중치를 결정하기 위해 다음의 방법이 사용되었다. 각 평면골조 i 의 가중치 (W_i)는 식 (2)와 같이 해당 국부 손상도 계수 (D_i)와 그 평면골조의 분담 하중의 곱으로 정의된다. 평면골조의 분담 하중 ($w_i \cdot A_{Di}$)은 국부손상영향면적 (A_{Di}) 위의 전체 하중 (w_i)으로 구해진다. 즉, w_i 는 국부 손상도 계수 (D_i)가 산정된 평면골조의 영향면적 (A_{Di})위에 있는 분포하중이다.

$$W_i = w_i \cdot A_{Di}(D_i) \quad (2)$$

여기서, 기여면적 (A_{Di})은 평면골조 i 의 국부 손상도가 건물의 전체 손상도에 기여하는 정도를 계산하는 바탕이 된다. 이는 각 평면골조의 개별손상영향면적과 교차손상영향면적으로부터 산정한다. 이후로 국부손상영향면적을 줄여서 이 논문에서는 영향면적으로 표시한다. 영향면적의 정의 및 설명은 다음의 소절에 나타나 있다.

2.3.2 영향면적

평면골조 i 의 손상에 의해 건물의 안정성에 영향을 받는 부분을 그 골조의 영향면적 (A_i)이라 하고, 골조 i 의 손상 정도에 따라 $A_{i,min}$ 과 $A_{i,max}$ 사이에서 결정된다. 평면골조의 손상이 경미한 경우에는 그 영향을 받는 부분 (영향면적)이 설계 중력하중의 분포면적 ($A_{i,min}$)에 국한되지만, 심한 손상으로 평면골조가 붕괴에 이를 경우 그 영향면적은 인접한 골조까지 이어지게 되며 이를 붕괴면적 ($A_{i,max}$)이라 정의한다. 즉, 평면골조 i 의 가중치를 결정하는 영향면적 (A_i)은 그 골조의 손상도 (D_i)에 따라 가변적이며 최소값 ($A_{i,min}$)은 분포면적이고 최대값은 붕괴면적($A_{i,max}$)이다. 이는 가중평균을 이용한 손상도 계수의 산정에 관한 기존의 연구들^{(10),(11)}이 국부 손상도의 가중치로 단순한 중력하중의 분포면적 (이 논문에서는 분포면적, $A_{i,min}$)을 사용해 왔던 것과는 다르다.

기여면적과 영향면적의 정의 및 설명은 그림 4의 영향면적 매트릭스에 나타나있다. 여기서, D_1 과 D_2 는 각각 골조 1과 골조 2의 손상도 계수이다.

그림 4의 영향면적 매트릭스에서 첫 번째 행은 골조1의 영향면적을 나타내며 각 경우에 대한 영향면적은 다음과 같이 결정된다.

- (a) Case A : 평면골조1의 손상 수준이 경미한 경우, 국부 손상의 영향면적은 분포면적 ($A_{1,min}$)이다. 여기서, D_m 은 경미한 손상수준을 나타낸다.
- (b) Case B : 영향면적 (A_i)은 두 가지 경우 (Case A와 Case C)사이에서 보간법으로 결정되어진다. A_i 의 값은 해당 평면골조의 손상도에 따라 분포면적 ($A_{1,min}$; Case

A)과 붕괴면적 ($A_{1,max}$; Case C)사이의 값으로 정해지며 다음과 같이 표현된다.

$$A_1 = A_{1,min} + (A_{1,max} - A_{1,min}) \cdot \frac{D_1 - D_m}{D_{max} - D_m} \quad (3)$$

$$= A_{1,min} + (A_{1,max} - A_{1,min}) \cdot D_1$$

여기서, D_1 은 평면골조 1의 손상도 계수이며, $A_{1,min}$ 과 $A_{1,max}$ 는 각각 분포면적과 붕괴면적이다. 붕괴에 이르는 최대 손상도 계수 D_{max} 는 1.0이며, 경미한 손상수준은 $D_m=0$ 으로 가정한다.

- (c) Case C : 만약 평면골조 1의 손상도가 붕괴수준에 이르면 ($D_1 \geq 1.0$), 그 손상의 영향을 받게 되는 부분은 분포면적에 제한되는 것이 아니라 인접한 골조까지 확대된다. 이 경우 두 평면골조에 의해 공유된 전체 면적이 평면골조 1의 영향면적으로 간주되고 이를 붕괴면적 ($A_{1,max}$)이라 한다.

영향면적 매트릭스 (그림 4)의 두 번째 행은 평면골조 2에 대한 영향면적을 나타내며 계산방법은 위의 평면골조 1의 경우와 같다.

인접한 평면골조들의 영향면적들 (A_i, A_j)끼리 겹치는 부분을 교차영향면적 ($A_{cm,ij}$)이라 한다.

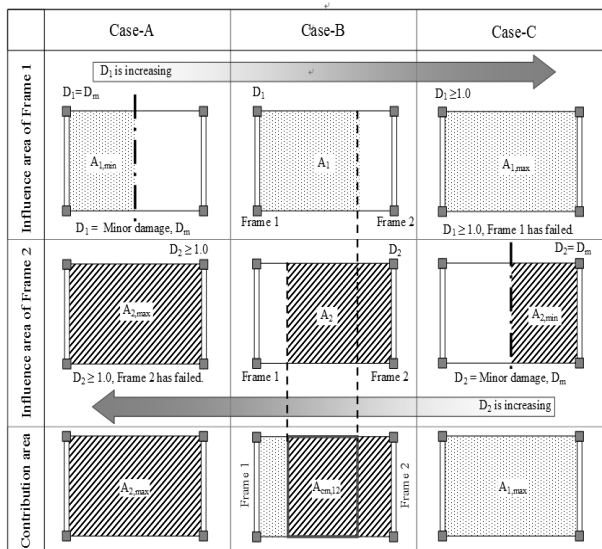
2.3.3 기여면적

평면골조 i 의 기여면적 (A_{ci})은 그 골조의 손상도 (국부손상도)가 전체 손상도에 기여하는 정도를 계산하는 근거가 된다. 기여면적은 평면골조의 영향면적의 합에서 교차영향면적의 중복계산을 고려하여 결정한다. 즉, 모든 기여면적의 합이 건물의 전체면적과 같게 하기 위하여, 인접한 평면골조들 사이의 중복된 영향면적을 개별 영향면적의 합 산정에서 제외해야 한다.

평면골조 1과 평면골조 2의 영향면적의 교차영역을 교차영향면적 ($A_{cm,12}$)이라 하며, 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$A_{cm,12} = (A_{1,max} - A_{1,min}) \cdot D_1 + (A_{2,max} - A_{2,min}) \cdot D_2 \quad (4)$$

교차영향면적은 보다 심한 손상을 입은 평면골조의 기여면적에 포함되는 것으로 간주한다. 즉, 손상이 더 심한 평면골조 (국부부재)의 영향이 교차영향면적을 지배한다. 예를 들어, 평면골조 2의 손상이 평면골조 1보다 크다면 ($D_1 < D_2$), 두 골조들의 기여면적 (A_{c1} 과 A_{c2})는 각각 평면골조 1과 2의 기여면적)은 식 (5)와 식 (6)과 같이 계산될 수 있다.



〈그림 4〉 영향면적 매트릭스

〈표 1〉 평면골조의 가중치 산정을 위한 영향면적 요약

면적	설명	기호
영향면적	개별 평면골조 국부손상의 영향을 받는 부분의 면적	A_i
분포면적	영향면적의 최소값($D_i=0$ 일 때): 평면골조의 설계 중력하중 분포면적	$A_{i,min}$
붕괴면적	영향면적의 최대값($D_i=1.0$ 일 때): 평면골조 붕괴 시 영향을 받는 부분의 면적	$A_{i,max}$
교차 영향면적	인접한 평면골조들의 영향면적끼리 겹치는 부분의 면적	$A_{cm,ij}$
기여면적	전체손상도에 대한 국부손상도의 기여 $D_i < D_j$ 일때, $A_{Ci} = A_i - A_{cm,ij}$; $A_{Cj} = A_j$	A_{Ci}

$$A_{C1} = A_1 - A_{cm,12} = A_{1,min} - (A_{2,max} - A_{2,min}) \cdot D_2 \quad (5)$$

$$A_{C2} = A_2 = A_{2,min} + (A_{2,max} - A_{2,min}) \cdot D_2 \quad (6)$$

인접한 두 평면골조 중에서 손상이 더 심한 골조 2의 기여면적은 영향면적과 같다 (식 (6)). 반면, 손상이 덜한 골조 1의 기여면적 식 (5)는 식 3의 영향면적 (A_1)으로부터 식 4의 교차영향면적 ($A_{cm,12}$)을 제외한 값이다.

이상의 영향면적과 기여면적에 대한 정의와 기호가 표 1에 정리되어 있다.

2.3.4 가중평균의 계산

그림 4의 예제 건물의 전체손상도 계수 (D_g)는 다음과 같이 평면골조 손상도 계수 (D_1, D_2)의 가중평균으로 나타낼 수 있다.

$$D_g = \frac{W_1 \cdot D_1 + W_2 \cdot D_2}{W_{total}} \quad (7)$$

여기서, W_1 과 W_2 는 각각 평면골조 1과 평면골조 2의 가중치를 나타내며 식 (2)를 적용하면 식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_g = \frac{w_1 \cdot A_{C1} \cdot D_1 + w_2 \cdot A_{C2} \cdot D_2}{W_{total}} \quad (8)$$

여기서, w_1 과 w_2 는 기여면적 (A_{C1}, A_{C2}) 상의 중력하중이다. 중력하중이 균일하게 분포한다고 가정하면, 식 (8)은 다음과 같이 작성될 수 있다.

$$D_g = \frac{A_{C1} \cdot D_1 + A_{C2} \cdot D_2}{A_{total}} \quad (9)$$

그리고 식 (5)와 (6)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$D_g = \frac{A_{1,min} \cdot D_1 + A_{2,min} \cdot D_2}{A_{total}} + \frac{A_{2,max} - A_{1,max}}{A_{total}} \cdot D_2 (D_2 - D_1), D_2 > D_1 \quad (10)$$

식 (10)으로부터 전체 손상도 계수의 일반적인 공식은 식 (11)과 같이 정리될 수 있다.

$$D_g = \frac{1}{A_{total}} \sum (A_{i,min} D_i) + \frac{1}{A_{total}} \sum_{i \neq j} [Max(D_i, D_j) |D_i - D_j|] \quad (11)$$

여기서, 아래첨자 i 와 j 는 각 평면골조 (국부부재)를 지칭하며, A_{total} 은 전체면적이다.

이상의 3차원 손상도 계수의 검증과 적용에 대한 보다 자세한 내용은 Jeong and Elnashai⁽¹²⁾에 나타나 있다.

3. 편심과 손상도의 상호 관계 분석

3.1 예제 건물

편심과 손상도의 상호 관계를 분석하기 위하여 다양한 크기의 편심을 가지는 단층 건물에 대해 비선형 동적 해석을 수행하고 그 결과로부터 손상도 계수를 계산하였다. 예제 구조물은 2×2베이와 2×4베이 철근콘크리트 골조로 구성된 단층 건물들이며 그 형상과 해석 모델의 개요가 그림 5에 나타나 있다.

예제 구조물들의 질량은 평면에 균일하게 분포되어 있어서 질량 중심은 평면의 중심에 위치하고 있다. 각 건물의 평면상 편심이 전체 넓이의 0% (대칭), 10%, 20%, 30%에 해당하도록 기둥의 크기와 철근량을 변화시켜 강성 중심의 위치를 조절하였다. 이때 건물의 2차원적인 주기와 강도에는 변함이 없도록 하였는데, 그림 6으로부터 예제 건물들의 편심 크기가 달라도 건물의 2차원 능력곡선이 서로 일치함을 확인할 수 있다. 이는 편심 이외의 다른 변수가 건물의 거동에 영향을 주는 것을 최소화하기 위함이다.

예제 건물의 해석을 위해서 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ZEUS-NL⁽¹³⁾이 사용되었다. 이 프로그램은 fiber 모델을 이용하여 소성 거동의 부재 길이 방향으로의 진행과 3차원 상호작용 (M-M-N Interaction)을 정밀하게 예측할 수 있다. 따라서 면외 거동을 보이는 비정형 평면을 가진 골조 건물의 해석에 적합하다.

3.2 비선형 시간이력 해석

비정형 평면을 가진 건물의 3차원 지진 응답을 바탕으로 손상도를 분석하고 편심과의 관계를 조사하기 위하여 비선형 동적 시간이력 해석이 수행되었다. 각 건물에 15개의 지진파 (표 2)를 적용하였으며, 예제 건물의 편심이 정의되는

〈표 2〉 해석에 사용한 지진파 목록

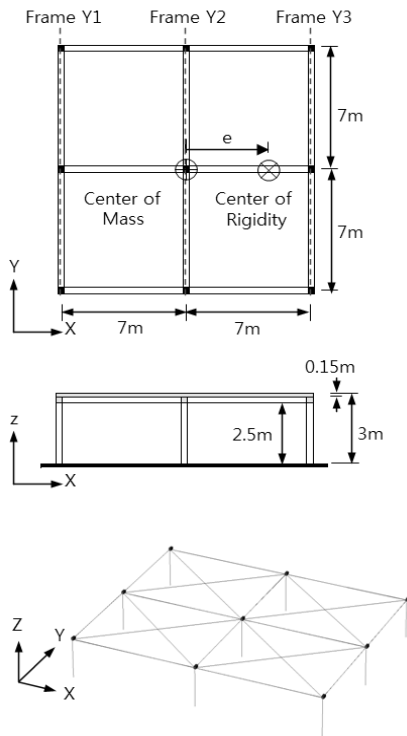
No.	Earthquake	Station
1	Friuli 1976	Tolmezzo
2	Calabria 1978	Ferruzzano
3	Montenegro 1979	Hercignovi
4	Alkion 1981	Xilokastro
5	Preveza 1981	Preveza
6	Golbasi 1986	Golbasi
7	Filippias 1990	Preveza
8	Erzincan 1992	Erzincan-Meteorologij Mudurlu
9	Umbria Marche 1997	Nocera Umbra
10	Statit of Gibraltar 1993	Adra-Rdfugio de la Plaza
11	Potenza 1990	Brienza
12	Ano Liosia 1999	Athens-Sepolia
13	Gazli 1976	Kalakyr
14	Duzce 1999	LDEO Sarion No.C0375 VO
15	Azores 2000	Horta

방향에 직각인 Y방향 (그림 5)을 지진파의 진행 방향으로 가정하였다.

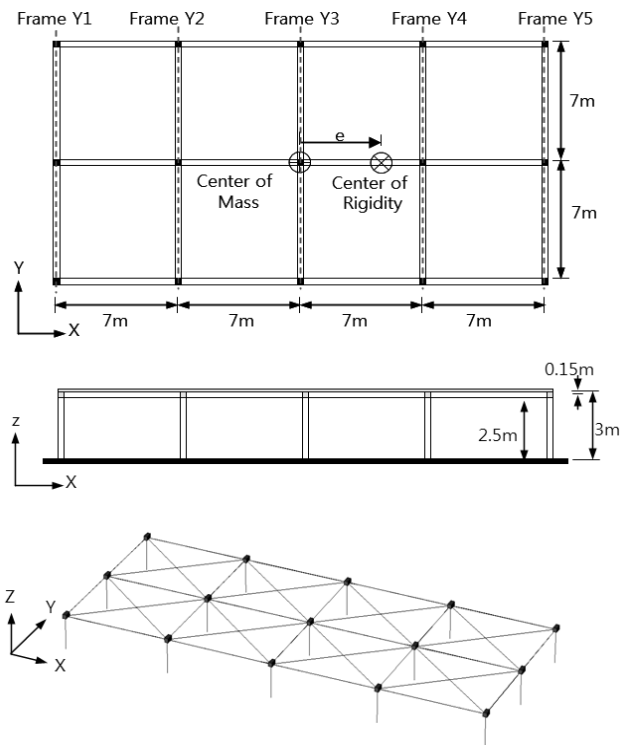
지진동 크기의 영향을 조사하기 위하여 각 지진파의 최대 지반가속도 (PGA)를 0.1g에서 0.4g까지 0.1g 간격으로 조절하여 사용하였다. 해석에 사용한 지진파들의 최대지반가속도가 0.2g일 때, 감쇠율 5%의 탄성응답스펙트럼은 그림 7과 같다.

예제 건물의 최대변위와 최대비틀림 각도의 평균값을 편심과 지진동의 크기에 대해 정리한 결과가 그림 8과 그림 9에 나타나 있다. 최대변위는 건물의 질량 중심인 평면의 중심에서 측정하였으며 편심이 커질수록 줄어드는 경향이 있으며 큰 차이가 없음을 그림 8로부터 관찰할 수 있다. 최대비틀림 각도는 양단부 상대변위를 지진파 진행방향의 직각 방향인 평면치수로 나눈 값으로 계산하였으며 편심이 커질수록 증가하는 것을 그림 9에서 확인할 수 있다.

그림 8로부터 2×2베이와 2×4베이 예제 건물의 최대변위는 같은 편심과 지진동의 크기에서 유사하다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 9에서 볼 수 있듯이 일반적으로 2×2베이 건물의 최대 비틀림은 2×4베이 건물의 최대비틀림보다 크다. 이는 2×2베이 건물이 2×4베이 건물보다 비틀림 강성이 작기 때문이다.

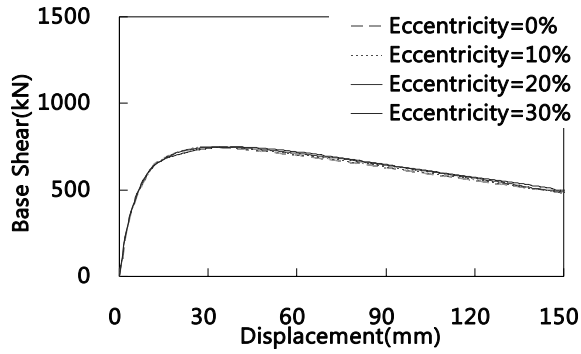


(a) 2×2베이 예제 건물

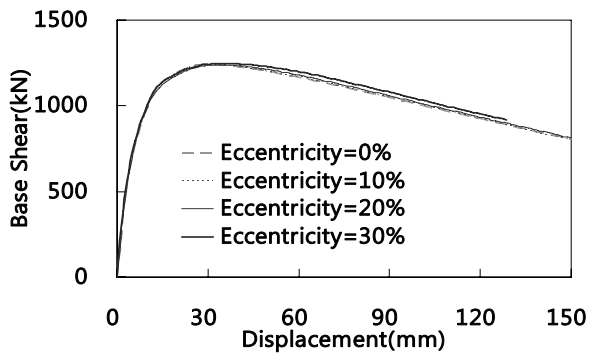


(b) 2×4베이 예제 건물

〈그림 5〉 예제 건물의 개요 (평면, 단면, 3차원 해석모델)

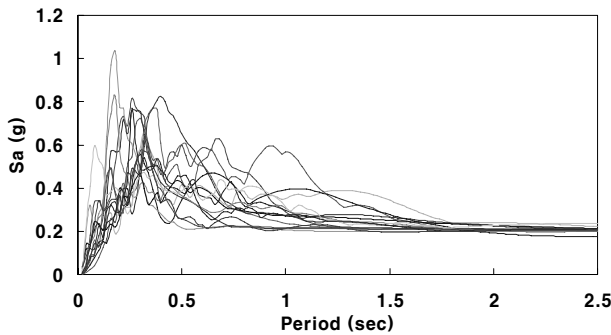


(a) 2×2베이 예제 건물



(b) 2×4베이 예제 건물

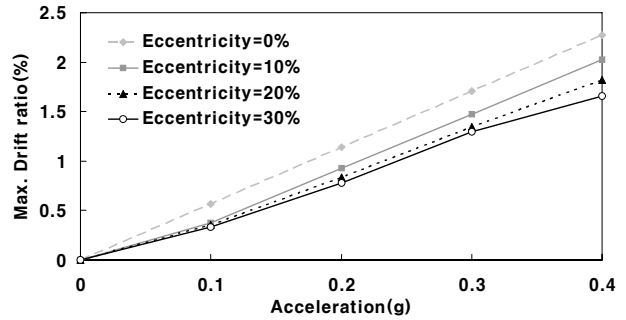
〈그림 6〉 예제 건물의 횡하중-변위 곡선



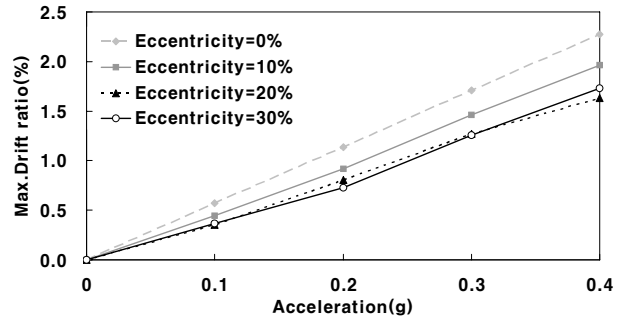
〈그림 7〉 사용된 지진파 Set의 스펙트럼 (PGA = 0.2g)

3.3 손상도 분석

이 논문의 2절에서 설명된 절차를 예제 건물들의 비선형 동적 해석 결과에 적용하여 3차원 손상도 계수를 산정하였다. 각 예제 건물의 연약단부의 손상도 및 전체 손상도의 평균값을 편심과 지진동의 크기에 대해 정리한 결과가 그림 10과 그림 11에 각각 나타나 있다. 편심의 크기가 클수록 연약 단부 (골조선 Y1)의 국부 손상도가 증가하며 손상이 집중되는 경향을 그림 10에서 확인 할 수 있다. 예제 건물인 2×2베이와 2×4베이 건물들의 질량 중심에서의 최대 변위는 서로 차이가 거의 없으나, 최대 비틀림은 2×2 베이 건물이 2×4베이 건물보다 다소 큰 것으로 관찰되었다. 하지만, 2×2베이 건물은 질량 중심으로부터 연약 단부까지

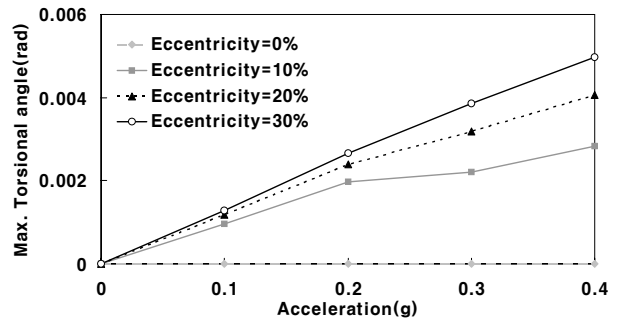


(a) 2×2베이 건물

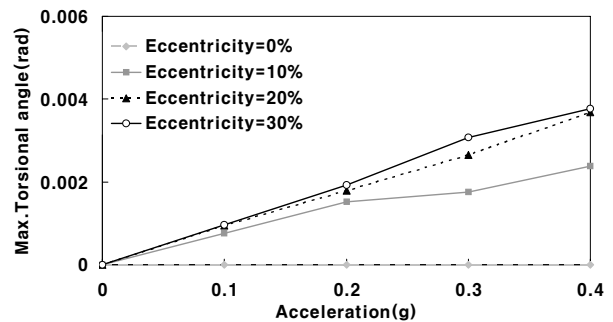


(b) 2×4베이 건물

〈그림 8〉 예제 건물의 최대 변위 평균값



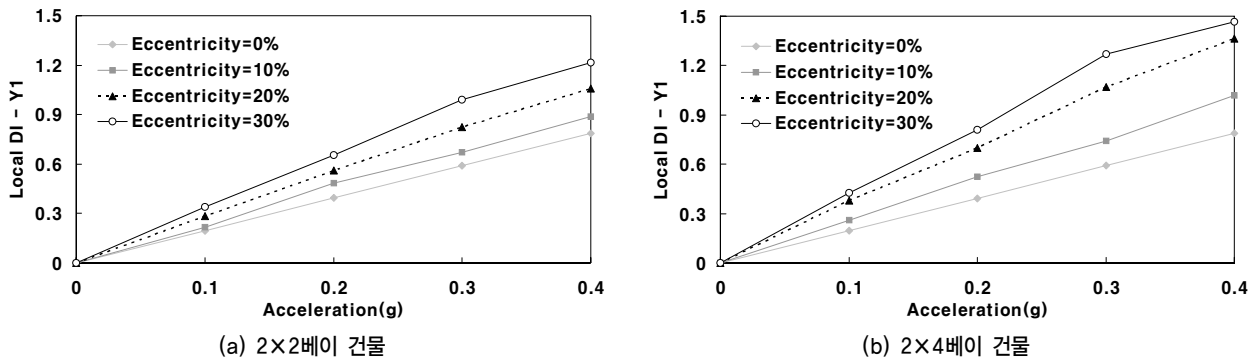
(a) 2×2베이 건물



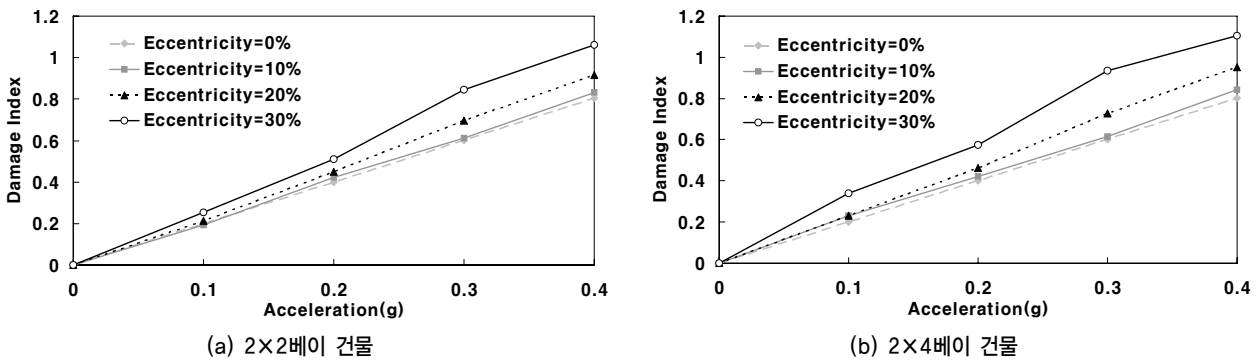
(b) 2×4베이 건물

〈그림 9〉 예제 건물의 최대 비틀림 각도 평균값

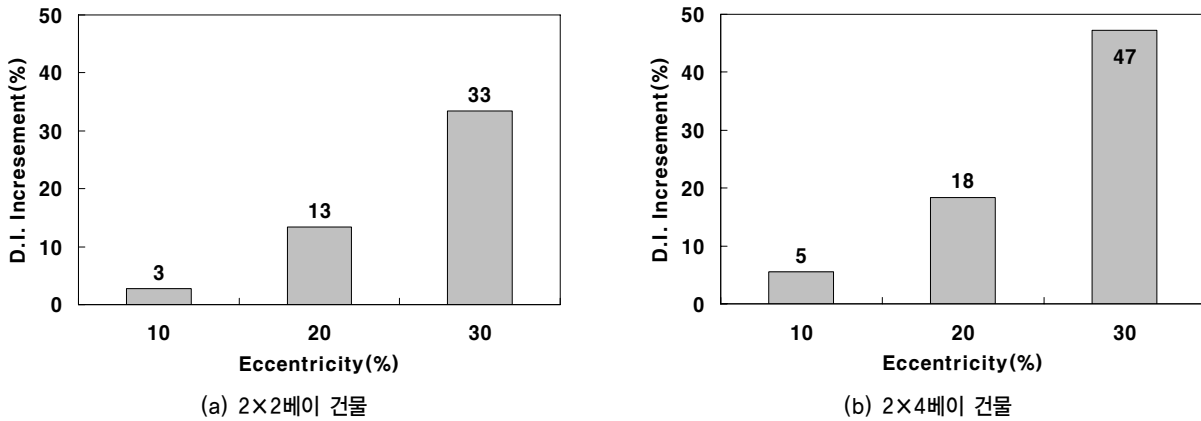
의 거리인 비틀림 팔길이가 짧아서 연약 단부의 손상도 집중 현상이 줄어들게 된다. 따라서, 편심의 크기가 같을 때 2×2베이 건물이 2×4베이 건물의 전체 손상도는 큰 차이가 없다. 정형 (편심 0%)일 경우 예제 건물들의 손상도 계수는 같으나 비정형일 경우 2×4베이 건물의 손상도 계수가 2×2



〈그림 10〉 예제 건물의 연약 단부 손상도 계수 평균값



〈그림 11〉 예제 건물의 손상도 계수 평균값



〈그림 12〉 편심의 크기에 따른 손상도 계수의 증가치

베이 건물에 비해 약간 높게 나타나는 경향이 있으나 그 차이는 편심의 영향에 비하면 아주 작다.

이상의 손상도 계수를 편심의 크기에 따라 다시 분류하여 평균을 구하면 그림 12와 같다. 이는 본 연구의 해석결과를 토대로 최대 지반 가속도가 0.1~0.4g의 범위에 있는 중약진 지역에서 비정형 건물의 손상도가 대칭인 건물에 비해서 얼마나 증가했는지를 분석한 것이다. 즉, 편심의 크기가 10%인 단층 건물의 경우 손상도는 편심이 없는 건물에 비해서 평균 3~5% 증가한다고 예상된다. 편심의 크기가 20%인 건

물은 손상도가 평균 13~18% 정도 증가하며, 편심의 크기가 30%인 건물은 평균 33~47% 정도의 손상도 증가를 보인다고 분석된다. 본 소절에서 관찰된 바와 마찬가지로 그림 12-(a)와 12-(b)의 비교에서 알 수 있듯이 건물의 길이가 손상도의 증가에 미치는 영향은 매우 작다.

4. 결론

지진발생 후 현장 탐사와 여러 연구자들의 분석을 통해서

비정형 평면을 가진 건물이 정형 건물에 비해서 지진에 의한 피해를 더 많이 입는다는 것이 알려져 왔다. 이러한 현상을 정량적으로 분석하기 위해서 본 논문에서는 양방향 거동과 비틀림의 영향을 동시에 반영할 수 있는 3차원 손상도 계수를 사용하여 다양한 크기의 편심을 가진 건물의 손상도를 분석하였다.

본 연구를 통해서 관찰된 비정형 평면을 가진 건물의 지진거동과 손상도에 관한 사항들은 아래와 같이 정리될 수 있다.

1. 건물의 편심이 커지면 최대변위는 줄어들지만 비틀림 거동이 증가하여, 손상의 집중으로 인해 전반적인 손상도 계수가 증가함이 관찰되었다.
2. 2차원 거동에서 1차 모드의 고유 주기가 같은 경우에, 예제 건물들의 질량 중심에서의 최대 변위는 서로 차이가 거의 없으나, 최대 비틀림은 2×2베이 건물이 2×4베이 건물보다 다소 큰 것으로 관찰되었다. 하지만, 2×2베이 건물은 질량 중심으로부터 연약 단부까지의 거리인 비틀림 팔길이가 짧아서 연약 단부의 손상도 집중 현상이 줄어들게 된다. 따라서, 편심의 크기가 같을 때 2×2베이 건물이 2×4베이 건물의 전체 손상도는 큰 차이가 없다. 정형(편심 0%)일 경우 예제 건물들의 손상도 계수는 같으나 비정형일 경우 2×4베이 건물의 손상도 계수가 2×2베이 건물에 비해 약간 높게 나타나는 경향이 있으나 그 차이는 편심의 영향에 비하면 아주 작다.
3. 중약진 지역에서 편심의 크기가 10%, 20%, 30%인 단층 건물은 편심이 없는 건물에 비해서 각각 평균 3~5%, 13~18%, 33~47% 정도의 손상도 증가가 있을 것으로 분석된다.

건물의 편심 크기와 손상도 증가에 대한 정량적인 관계 분석은 비정형 평면을 가진 건물의 내진 설계에 있어서 기본 구조 계획 수립과 내진 성능 평가에 유용한 자료가 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0077667)

참고 문헌

1. Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Report FEMA 273, Washington D.C., 2-29~31, 1997.
2. British Standards Institution, Eurocode 8 : Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1:2004, BSI, London, 49-50, 2004.
3. De La Llera, J., and Chopra, A., "Understanding the inelastic seismic behavior of asymmetric plan buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24(4), 549-72, 1995.
4. Emrah Erduran, "Assessment of current nonlinear static procedures on the estimation of torsional effects in low-rise frame building," *Engineering Structures*, 30(9), 2548-2558, 2008.
5. Park, Y.J., and Ang, A.H-S., "Mechanical seismic damage model for reinforced concrete," *J. Struct. Eng.*, 111(4), 722-739, 1985.
6. Chung, Y.S., Meyer, C., and Shinozuka, M., "Modeling of concrete damage," *Structural Journal, ACI*, 86(3), 326-340, 1989.
7. Bracci, J.M., Reinhorn, A.M., Mander, J.B., and Kunnath, S.K., Deterministic model for seismic damage evaluation of RC Structures, *Rep. NCEER-89-0033*, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York, Buffalo, 1989.
8. Banon, H., Biggs, J.M., and Irvine, H.M., "Seismic damage in reinforced concrete frames," *J. Struct. Eng.*, 107(9), 1713-1729, 1981.
9. Roufaiel, M.S.L., and Meyer, C., "Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C Frames," *J. Struct. Eng.*, 113(3), 429-444, 1987.
10. Park, Y.J., Ang, A.H-S., and Wen, Y.K., "Damage-limiting a seismic design of buildings," *Earthquake Spectra*, 3(1), 1-26, 1987
11. Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M., and Park, Y.J., "Analytical modeling of inelastic seismic response of RC structure," *J. Struct. Eng.*, 116(4), 996-1017, 1990.
12. Jeong, S.H., and Elnashai A.S., "Analytical modeling of inelastic seismic response of RC structure," *J. Struct. Eng.*, 132(9), 1482-1490, 2006.
13. Elnashai AS, Papanikolaou, V., and Lee, D.H., ZEUS-NL User Manual, University of Illinois at Urbana -Champaign/Mid-America Earthquake Center, 2002.