

평면 비대칭 벽식 구조물의 지진 취약도 분석

Seismic Fragility Analysis of Torsionally Irregular Wall Structures

하 태 휴*
Ha, Tae-Hyu

홍 성 곁**
Hong, Sung-Gul

ABSTRACT

Torsional behavior of eccentric structure under seismic loading may cause the stress and/or deformation concentration. Hence it is hard to estimate the seismic behavior of the structure with plan irregularity. This study suggests the method to setup the seismic fragility curve of the torsionally irregular structures. The suggested fragility curve may be acquired from the fragility surface defined on the D-R plan according to the estimated torsional behavior. The torsional behavior is predicted considering the inelastic region by adapting the inelastic stiffness of each wall. Finally the system displacement is converted to the spectral acceleration and the fragility curve for the seismic excitation level is presented. In addition, the fragility curve considering the excitation direction is proposed.

1. 서 론

편심이 있는 구조물이 지진하중을 받는 경우 횡변위 뿐만 아니라 비틀림이 발생하게 된다. 편심이 큰 구조물의 경우에는 과도한 비틀림으로 인해 그 거동을 예측하기가 쉽지 않고 설계자의 의도와는 다른 파괴모드를 유발하기도 한다. 본 연구에서는 편심을 지니는 평면 비대칭 구조물의 지진 취약도를 분석하고자 한다.

일반적인 구조물은 약한 지진하중에 대해 거의 피해를 입지 않을 것이고 반대로 극단적으로 강한 지진하중에 노출될 경우 붕괴될 것이라는 것은 누구나 예상할 수 있다. 이렇게 다른 지진수중에 대한 구조물의 피해 확률을 정량적으로 나타내고자 하는 시도 중 하나가 취약도 곡선(fragility curve)이다. 구조물에 대한 취약도 곡선은 실제 지진거동자료, 실험 결과, 해석결과, 단순해석모델 혹은 공학적 판단 등을 통해서 구할 수 있다[2]. 본 연구에서는 평면 비대칭 구조물의 거동을 수치적으로 단순화하여 하중수준에 따른 취약도 곡선을 얻어내고자 한다.

* 서울대학교 건축학과, 박사과정

** 서울대학교 건축학과, 부교수

2. 취약도 곡선의 작성

2.1 D-R 평면상의 변위 수준별 취약도 산정

기존에 Paulay등은 비정형 벽식 구조물의 비틀림을 고려한 파괴메커니즘을 가정하고 그 메커니즘에 따른 설계를 위한 연구를 수행하였다[4, 5]. 본 연구자의 이전 연구에서는 내진성능평가 및 성능보강을 위하여 다양한 파괴메커니즘을 하나의 평면상에 표현하는 그림2와 같은 변위 관계도(D-R: Displacement-Rotation relationship)를 제안하였다[1]. 그림1과 같이 벽식 구조물에 횡변위 Δ 와 비틀림각 ϕ 가 발생한다면 각각의 벽체에 발생하는 변위는 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 식(1)에서 다이어프램은 충분한 강성을 지닌다고(rigid diaphragm) 가정하고 각 벽체의 면외방향 변위는 무시하였다. 또한 지진하중은 y방향의 가력만을 고려한다.

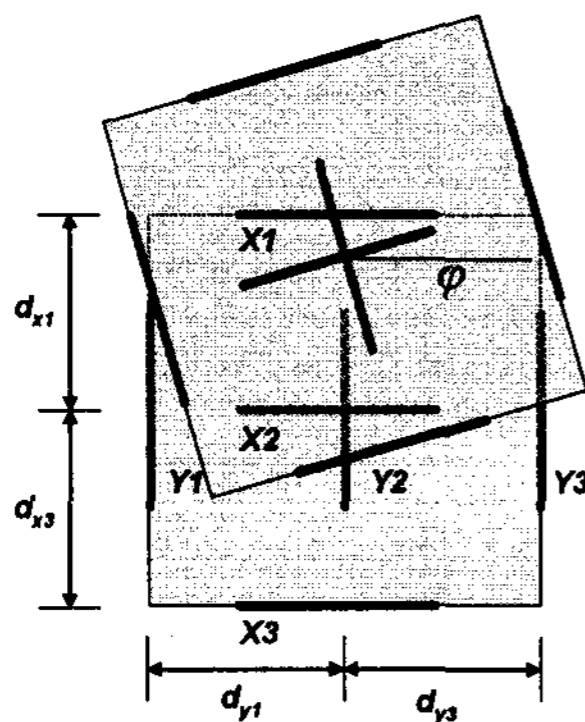


그림 1 구조체의 변형형상

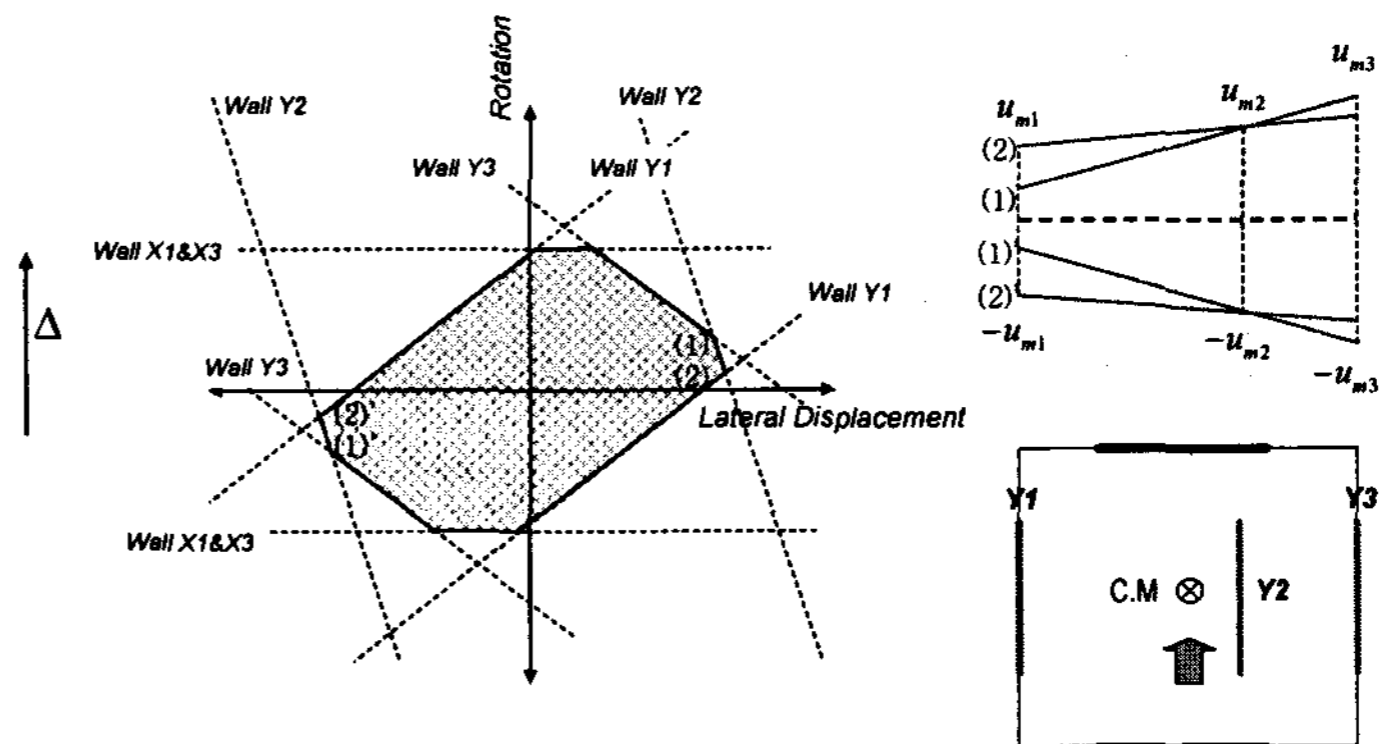


그림 2 D-R 평면상의 D-R 관계도의 설정

$$\begin{cases} \text{y-dir} : \phi d_i + \Delta = u_{mi} \\ \text{x-dir} : \phi d_i = u_{mi} \end{cases} \quad (1)$$

식(1)과 같이 산정한 각각 벽체의 변위를 기준으로 식(2)를 적용하면 D-R 관계도상의 모든 점에 대하여 개별 벽체의 파괴 확률을 산정할 수 있다.

$$P_f = P_r(R \leq S) = \int_0^{\infty} [1 - F_S(r)] f_R(r) dr \quad (2)$$

이때 위험도 산정을 위한 각 벽체별 변형 능력은 요구 성능 수준에 따라 다르게 선정할 수 있다. 최종적으로 개별 벽체의 파괴 확률 중 최대값으로 이루어진 하나의 면을 구성하면 그 면을 시스템의 취약도 곡면(fragility surface)라고 말할 수 있다.

2.2 비대칭 거동의 예측

평면 비대칭 구조물에 발생하는 비틀림은 식(3)과 같이 예상할 수 있다. 식(3)의 비틀림각은 각 벽체의 강성 및 배치만으로 결정되는 값이다.

식(3)은 모든 벽체의 탄성거동을 기준으로 하여 유도한 식이지만 벽체의 초기강성이 아닌 접선 강성을 사용하면 비탄성 상태에서 구조물에 발생하는 비틀림도 정성적으로 예상할 수 있다. Adaptive pushover 방법과 유사하게 각 벽체의 항복변위를 설정하고 항복이후 각 벽체의 강성을 update해서 사용하는 것이다. 그림3은 이러한 개념을 표현하고 있다.

$$\varphi = -\frac{\sum k_{yi} d_{yi}}{\sum k_i d_i^2} \Delta \quad (3)$$

그림3과 같이 예측한 탄성/비탄성 영역에서의 비대칭 구조물의 거동을 기준으로 2.1절에서의 구한 파괴 확률을 추출하면 구조물의 변위 수준에 따른 취약도 곡선을 작성할 수 있다.

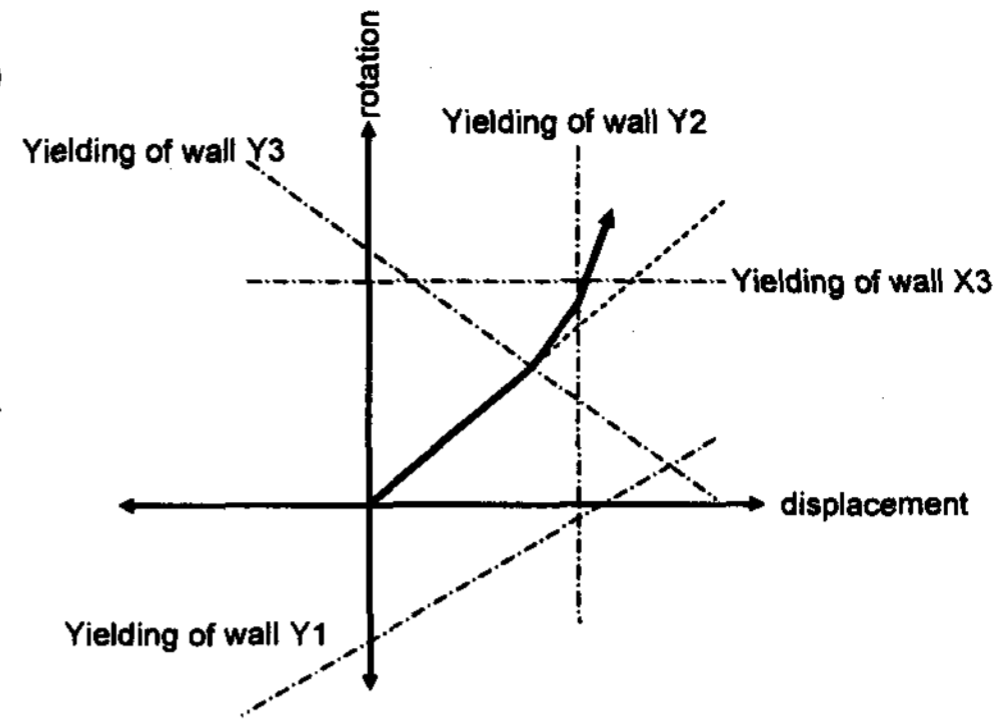


그림 3 비대칭 구조물의 횡변위 및 비틀림 관계

2.3 지진하중 수준별 취약도 곡선의 작성

앞 절에서는 D-R 평면상의 취약도 곡면을 이용하여 변위 수준별 취약도 곡선을 작성하였다. 본 절에서는 그 결과를 물리적으로 이해하기 쉬운 유효최대가속도별 취약도 곡선으로 변환하고자 한다. 일반적인 지진거동에서 변위와 가속도는 식(4)를 만족한다.

$$\Delta = S_d = S_a \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (4)$$

식(3)과 (4)를 이용하면 유효 주기가 T_{eff} 인 구조물에서 각 벽체에 발생하는 유효가속도별 변위는 x, y 방향의 벽체에 대해서 각각 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} y: u_{mi} = S_a \left(\frac{T_{eff}}{2\pi} \right)^2 \left[1 - \frac{\sum k_{yi} d_{yi}}{\sum k_i d_i^2} d_i \right] \\ x: u_{mi} = S_a \left(\frac{T_{eff}}{2\pi} \right)^2 \frac{\sum k_{yi} d_{yi}}{\sum k_i d_i^2} d_i \end{cases} \quad (5)$$

식(5)에서 유효주기 T_{eff} 를 산정하기 위한 구조물의 유효강성은 할선강성을 사용하였다.

2.4 재하 방향에 따른 취약도 곡선

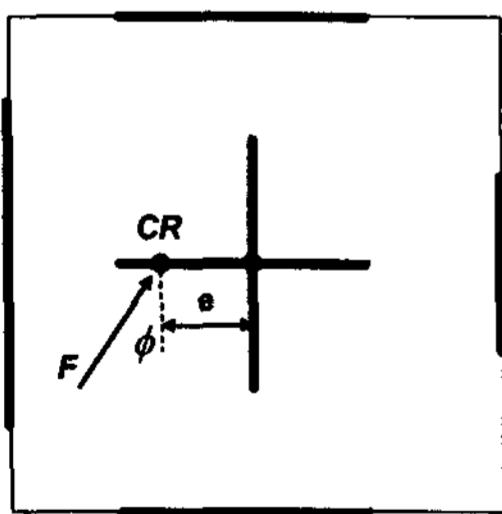


그림 4 하중재하 방향

재하 방향의 고려는 일반적인 내진설계나 평가의 과정에서 심도 있게 다루지는 내용이 아니지만 비틀림이 발생할 수 있는 구조물의 경우 재하방향의 고려는 필수적이다. 같은 구조물도 지진하중의 가력방향에 따라 다른 거동을 보이게 된다. 특히 편심이 심한 구조물의 경우에는 가력방향의 가정에 따라 그 거동의 차이가 크다. 일반적으로 지진하중의 가력방향은 구조물의 축과 다른 경우 지진하중을 두 개의 주방향으로 분리하여 해석을 수행한다. 그림4와 같이 지진하중의 가력이 y 방향과 ϕ 의 각도를 이룬다면 이 때 구조물에 발생하는 비틀림 모멘트 및 비틀림 각은 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$T = (e \cos \phi) F \rightarrow \varphi = \frac{\sum k_{yi} d_{yi} \cos \phi}{\sum k_i d_i^2} \Delta \quad (6)$$

식(6)을 이용하여 예상되는 구조물의 거동을 D-R 관계상에 그려낼 수 있고 이를 이용하면 지진하중의 재하방향에 따른 구조물의 취약도 곡선을 작성할 수 있다.

3. 취약도 곡선 작성 예제

앞에서 설정한 방식을 이용하여 몇 가지 예제 구조물에 대한 취약도 곡선을 작성하였다. 예제 구조물은 X, Y방향으로 각각 3개씩의 하중저항 벽체를 지니는 단층 3벽체 모델로 선정하였다.

3.1 예제 구조물의 설정

예제 구조물은 그림5와 같이 편심의 정도와 강성 배치를 조절하면서 모두 5개의 해석모델을 선택하였다. 다섯 개의 기준 구조물이 지니는 벽량은 X, Y방향 모두 동일하며 바닥판의 크기는 12m 정방형으로 설정하였다. 횡하중의 재하는 기본적으로 Y방향만을 고려하였으며 각각의 벽체는 동일한 항복 곡률을 지닌다고 가정하였다. 예제 구조물의 상세는 표1과 같다.

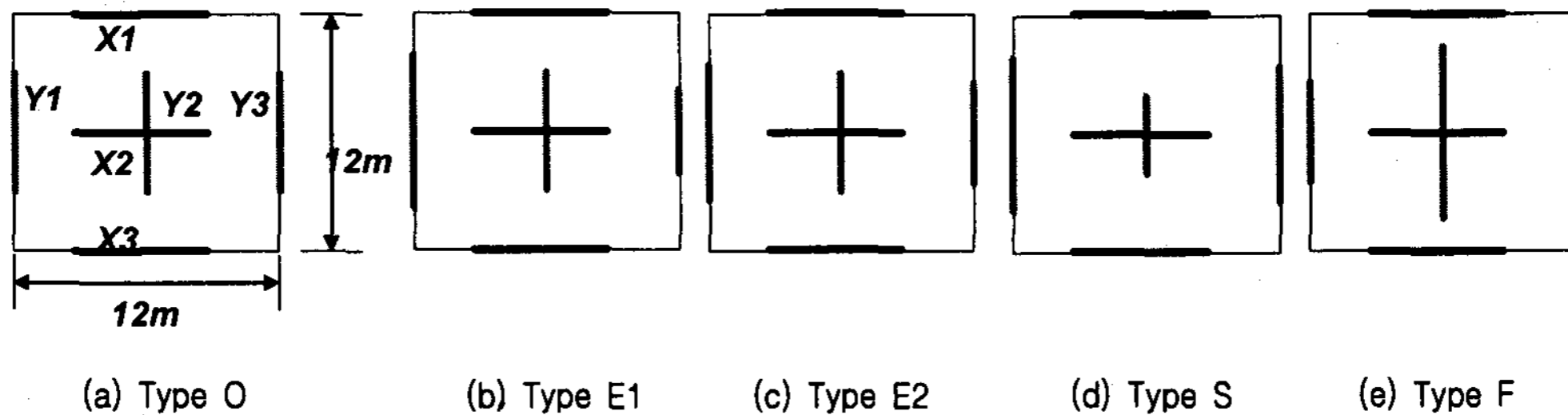


그림 5 3벽체 해석모델

표 1 예제 구조물 상세

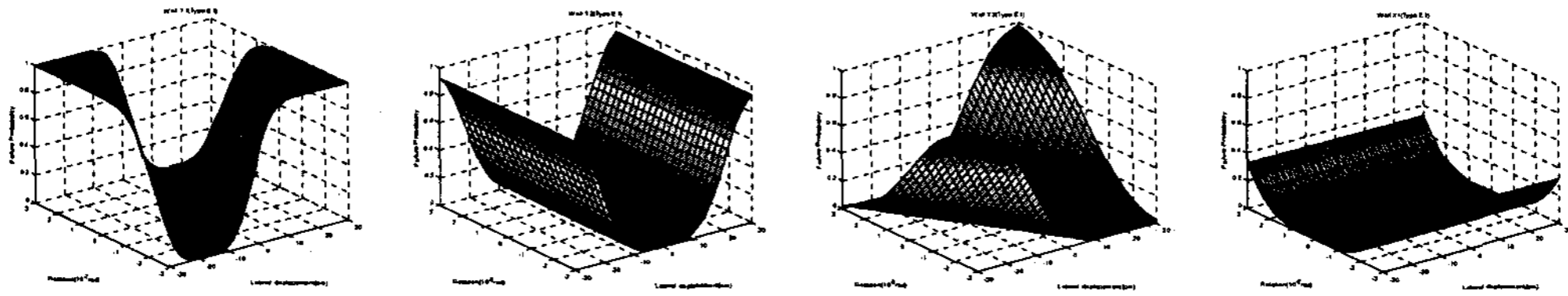
Analysis Model		Type O	Type E1	Type E2	Type S	Type F
Length (m)	Wall Y1	6.0	7.8	6.9	7.8	5.1
	Wall Y2	6.0	6.0	6.0	3.3	8.7
	Wall Y3	6.0	4.2	5.1	6.9	4.2
Yield Strength (kN)	Wall Y1	84.40	118.19	99.12	130.65	61.80
	Wall Y2	84.40	85.74	85.40	25.16	189.62
	Wall Y3	84.40	51.99	71.17	118.92	46.70
Stiffness (kN/m)	Wall Y1	1620.49	2949.90	2188.65	3260.94	1008.59
	Wall Y2	1620.49	1646.25	1639.76	265.65	5279.12
	Wall Y3	1620.49	698.12	1161.45	2625.86	627.59

3.2 취약도 곡선의 작성

D-R 관계에 나타나는 구조물의 파괴확률을 결정하기 위해서는 먼저 각 벽체별 변형 능력에 대한 목표성능수준을 설정해야 한다. 본 연구에서는 각 한계상태에 따른 목표성능수준을 표2와 같이 설정하였다[2]. 위에서 설정한 예제 구조물중 가장 큰 편심을 지니는 type E1 구조물에 대해 Moderate Structural Damage 상태에 대한 각 벽체별 파괴확률은 그림6과 같이 구해낼 수 있다.

표 2 벽체의 성능 수준별 변형능력

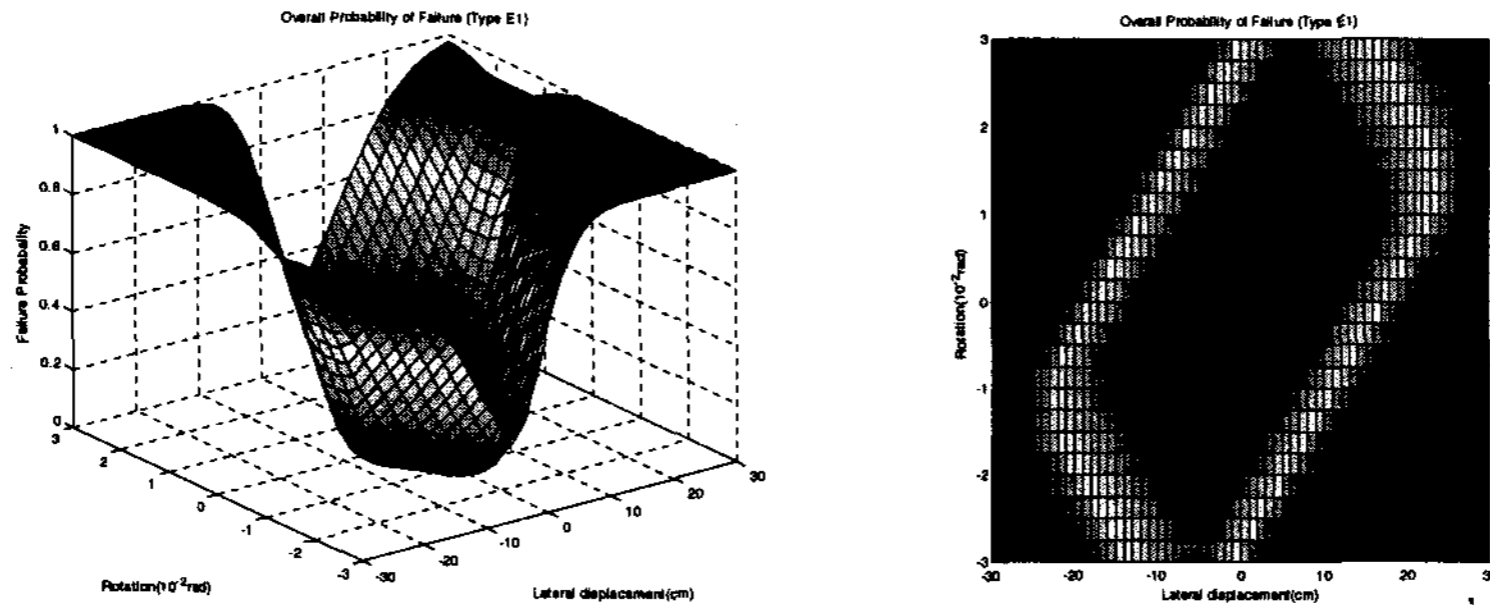
Limit State	μ_R	COV
Nonstructural Damage	1	0.3
Slight Structural Damage	2	0.3
Moderate Structural Damage	4	0.3
Severe Structural Damage	6	0.3
Collapse	7.5	0.3



(a) Wall Y1 (b) Wall Y2 (c) Wall Y3 (d) Wall X1~3

그림 6 Type E1의 개별 벽체 파괴확률 [Moderate Structural Damage]

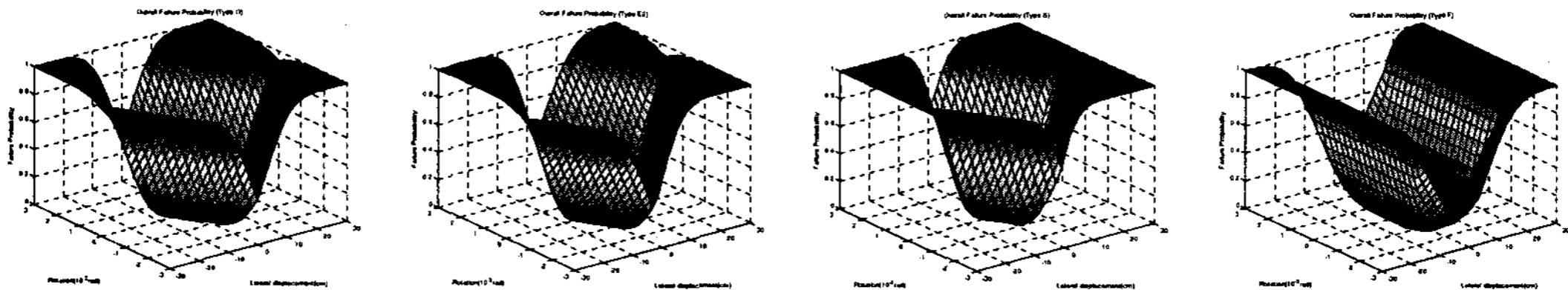
그림6과 같이 얻어진 개별벽체의 파괴 확률 중 최대값을 이용한 구조물 전체의 파괴확률은 그림7과 같이 얻어진다. 그림 7(b)는 얻어진 취약도 곡면의 contour로 D-R 관계도상에 개별 벽체의 변위한계를 연결한 곡선과 일치하게 된다.



(a) Isotropic View (b) Contour Plot

그림 7 Type E1의 취약도 곡면 [Moderate Structural Damage]

Type E1과 유사하게 다른 예제 구조물 및 다른 성능수준에 대해서도 그림8과 같이 각각 취약도 곡면을 구해낼 수 있다.



(a) Type O (b) Type E2 (c) Type S (d) Type F

그림 8 예제구조물의 취약도 곡면 [Moderate Structural Damage]

3.3 비틀림 거동의 예측

탄성 상태에서는 식(3)에 개별 벽체의 초기강성을 대입하여 횡변위와 비틀림 각도의 관계를 구해낼 수 있다. 일부 벽체가 항복하고 난 후에는 항복한 벽체의 강성을 접선강성으로 대체하고 다시 계산하게 된다. 이러한 과정을 반복하여 구조물의 비틀림 거동을 D-R 평면상에 표현할 수 있다. 본 연구에서는 문제를 단순화하기 위하여 모든 벽체가 5%의 초과강도계수를 지니는 이선형 거동을 한다고 가정하였다.

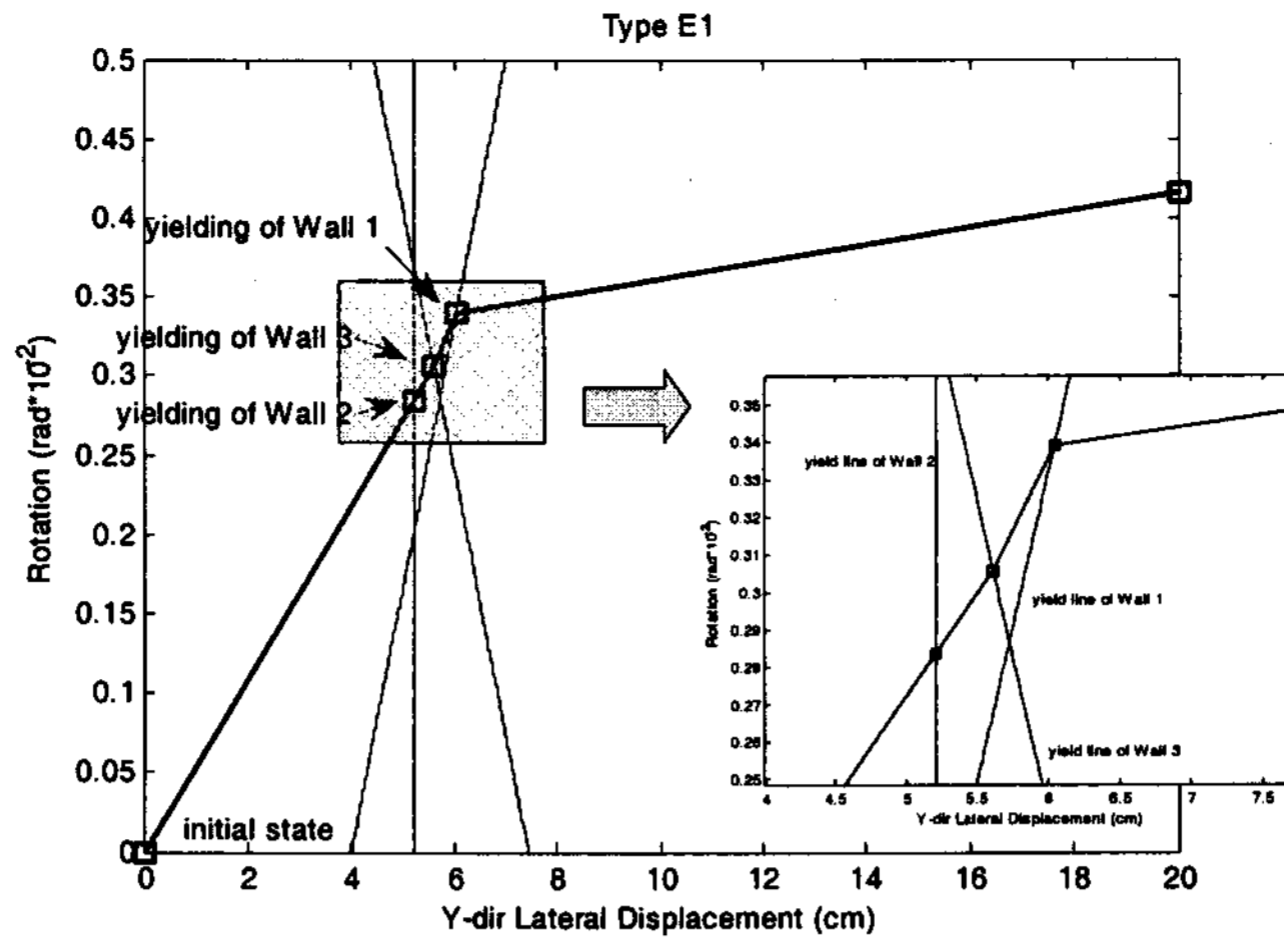


그림 9 Type E1 구조물의 비대칭거동

그림9는 이와 같은 과정으로 얻어진 type E1구조물의 비틀림 거동을 나타낸 것이다. 그림9에서 굵은 실선으로 표현된 것이 얻어진 비틀림 거동이고, 가는 실선은 각 개별 벽체들의 항복 한계를 표현한 것이다. 비틀림 거동을 나타내는 실선이 이러한 항복 한계와 만나는 지점에서 벽체의 강성을 다시 산정하게 된다. E1-type을 제외한 나머지 구조물의 비틀림 거동은 그림10과 같이 표현할 수 있다. 각 벽체의 항복 순서에 따라서 비틀림 거동의 특성은 큰 차이를 보이게 된다. 그림10에서 O-type은 편심이 없는 형식이므로 모든 벽체가 동시에 항복했고 이론적으로 구조물에 비틀림은 전혀 발생하지 않는다.

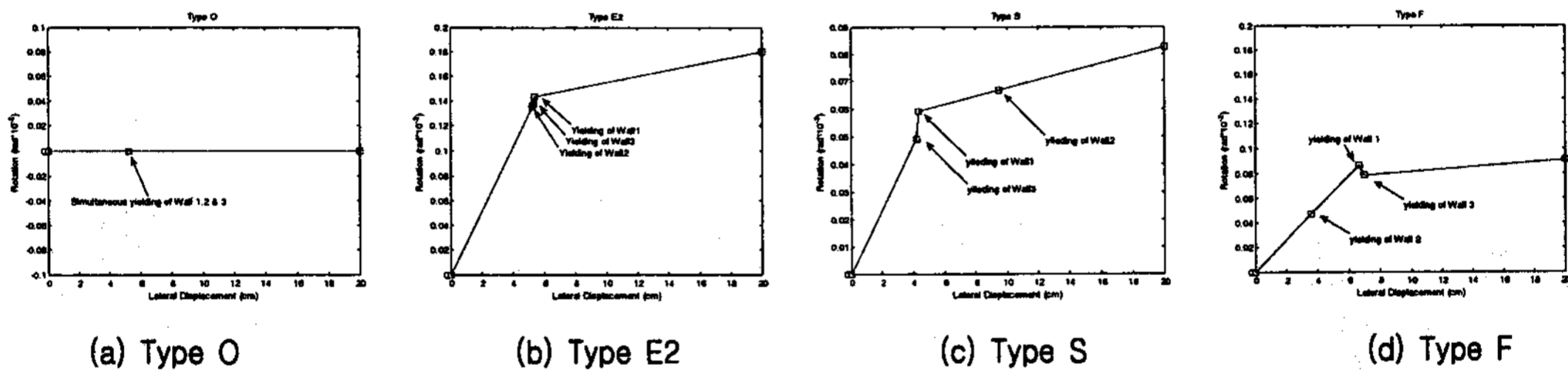
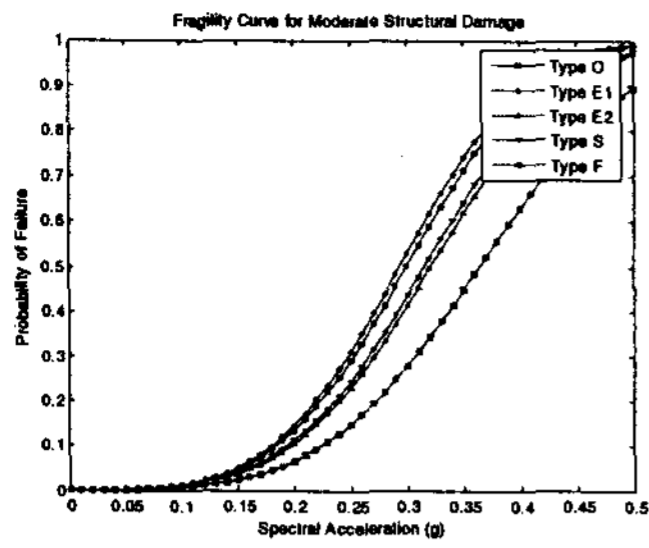


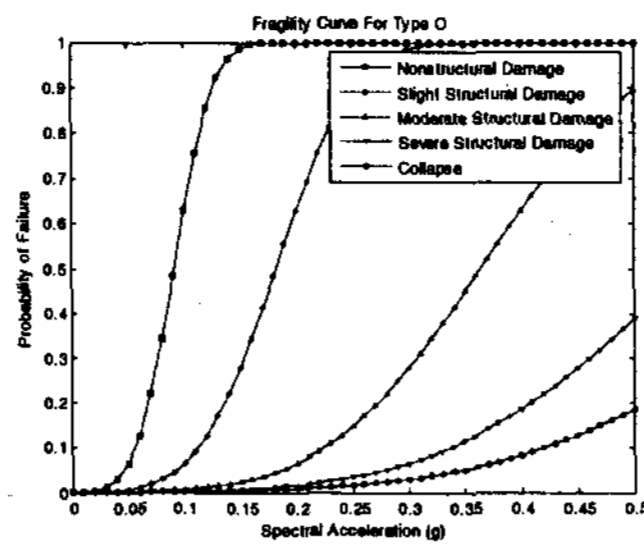
그림 10 예제구조물의 비대칭거동[D-R 관계]

3.4 지진하중 수준별 취약도 곡선

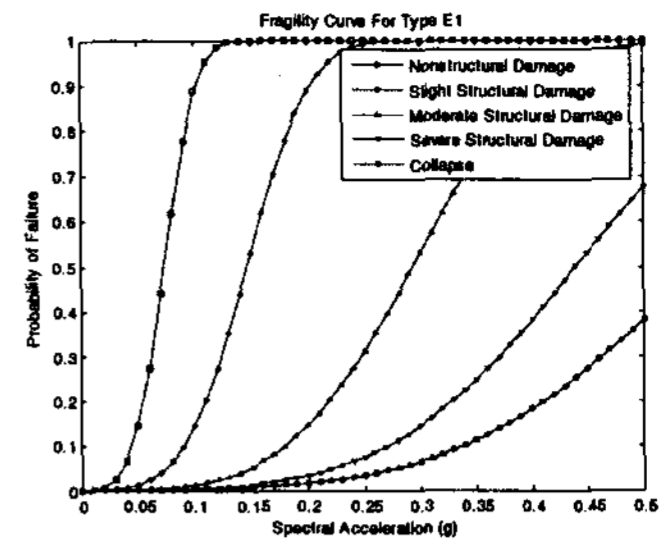
앞에서 구해낸 취약도 곡면과 예측된 비틀림 거동을 이용하면 지진 하중 수준별 취약도 곡선을 얻어낼 수 있다. 식(4)를 이용하여 유효 최대 가속도를 구조체에 발생하는 횡변위로 치환하고 그림9~10와 같은 구조물의 예측된 거동을 통해 그 때의 비틀림 각을 구해내게 된다. 최종적으로 횡변위-비틀림각에서의 파괴확률을 취약도 곡면에서 결정하면 유효가속도에 대한 파괴확률을 연결한 취약도 곡선을 얻어낼 수 있다. 그림11은 이런 방식으로 얻어진 하중 수준별 취약도 곡선을 보여준다.



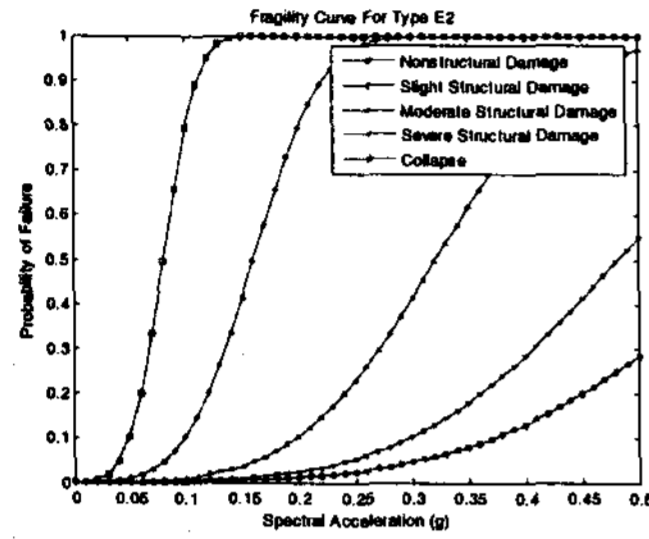
(a) Moderate Structural Damage



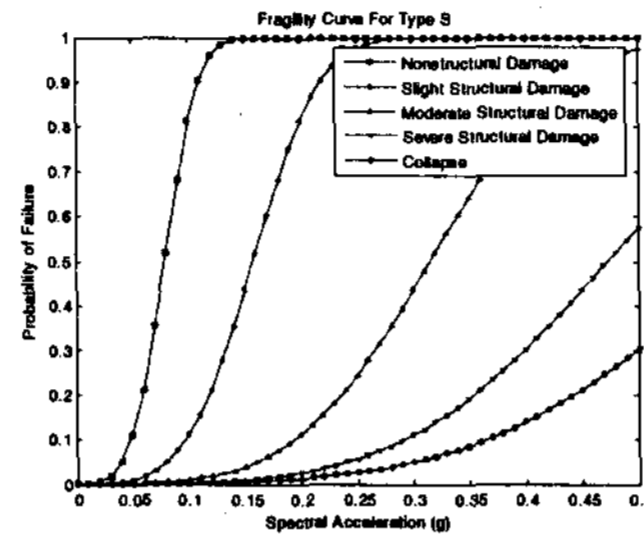
(b) Type O



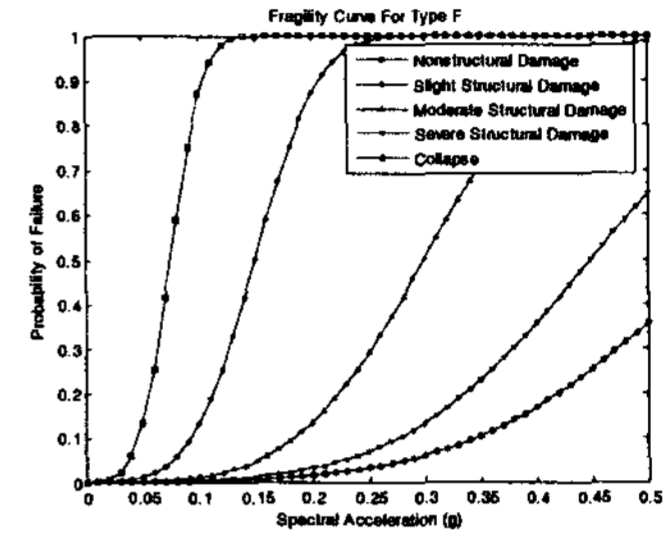
(c) Type E1



(d) Type E2



(e) Type S



(f) Type F

그림 11 하중 수준별 취약도 곡선

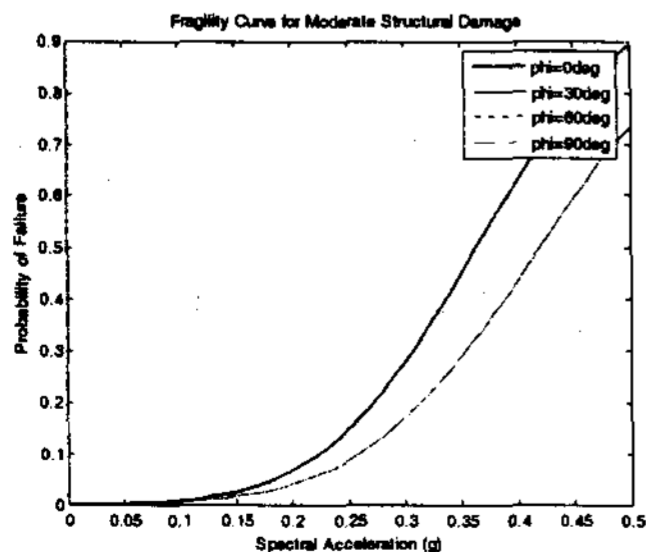
그림 11(a)에서 같은 한계상태를 가정하면 일반적으로 편심의 정도가 작은 구조물이 더 작은 파괴확률을 보인다는 것을 알 수 있다. 유효최대가속도가 0.2g인 경우에 대하여 위와 같은 취약도 곡선으로부터 파괴확률을 찾아내면 그 결과는 표3과 같다.

표 3 한계상태별 파괴확률 [PGA=0.2g]

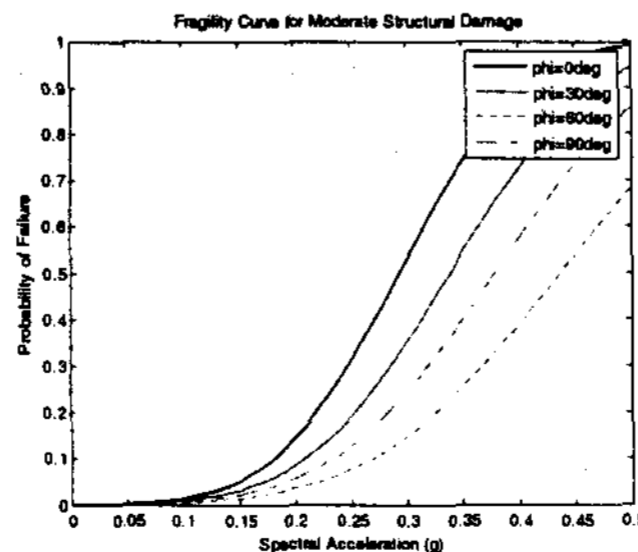
Limit State	Type O	Type E1	Type E2	Type S	Type F
Nonstructural Damage	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Slight Structural Damage	0.6288	0.8875	0.7930	0.8147	0.8686
Moderate Structural Damage	0.0665	0.1446	0.1041	0.1114	0.1342
Severe Structural Damage	0.0173	0.0346	0.0256	0.0272	0.0137
Collapse	0.0092	0.0170	0.0130	0.0137	0.0159

3.5 재하방향을 고려한 취약도 곡선

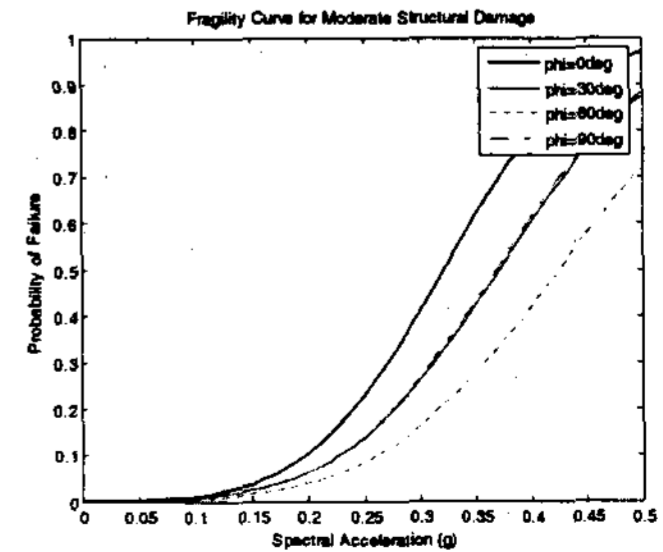
마지막으로 앞서와 예제 구조물에 대해서 하중의 재하방향을 조절하면서 그에 따른 취약도 곡선을 작성하였다. 재하 방향을 고려한 취약도 곡선은 그림 12와 같다.



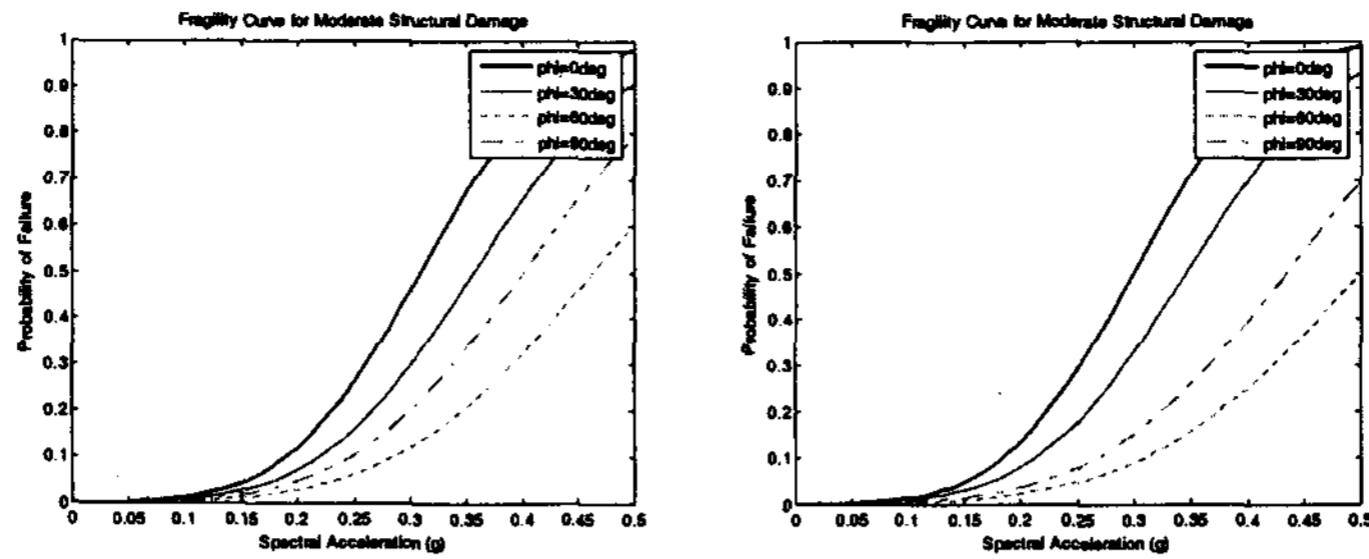
(a) type O



(b) type E1



(c) type E2



(d) type S

(e) type F

그림12 재하방향을 고려한 취약도 곡선

4. 결론

본 연구는 단층 비대칭 벽식 구조물에 대해 비틀림을 고려하는 취약도 곡선을 작성하는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 구조물 전체의 변위거동을 하나의 평면에 표현하고 예측한 구조물의 거동을 기준으로 해서 지진 수준별 취약도를 구해내었다. 구조물의 형상 및 편심의 정도에 따라 구조물은 큰 거동의 차이를 보이고 지진위험도에서도 차이를 보였다. 단 본 연구에 제시되는 지진위험도는 간단한 수학적 가정으로부터 얻어지는 것이므로 그 신뢰성의 확보를 위해 향후 상세해석 및 실험결과를 통한 검증이 필요로 한다.

감사의 글

본 연구는 2004년 한국학술진흥재단의 지원으로 연구되었습니다. [KRF-2004-041-D00751]

참고문헌

1. Hong S. G. and Ha T. H. "Seismic Assessment and Retrofit of Torsionally Irregular RC Wall Structures," KEERC International Seminar on Innovative Concepts and Technologies in Seismic Analysis and Design of Building Structures, February 17, 2005
2. Jing-Wen Jaw, Howard H. M. Hwang, "Seismic Fragility Analysis of Shear Wall Structures", Technical Report NCEER-88-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, SUNY Buffalo, 1988
3. Kan C. L., Chopra A. K., "Torsional coupling and earthquake response of elastic and inelastic systems," Journal of structural engineering, ASCE, No. 107, pp. 1569-1588, 1981
4. Paulay T., "Displacement-based design approach to earthquake-induced torsion in ductile buildings," Engineering structures, Vol. 19, No. 9, pp. 699-707, 1997
5. Paulay T., "Some Design principles relevant to torsional phenomena in ductile buildings," Journal of earthquake engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 273-308, 2001
6. 조봉호, "변형에 기초한 비대칭 벽식 구조의 내진설계", 박사학위논문, 서울대학교, 2002
7. 하태휴, 홍성걸, 김남희, "Adaptive Pushover를 이용한 비대칭 벽식 구조의 내진성능평가", 2004년도 춘계 한국 지진 공학회 학술발표회 논문집, Vol 8, No. 1, pp. 245~252, 2004