

# 지진 취약도 분석 및 보수 비용 평가

## Seismic Fragility and Repair Cost Evaluation



이준호\*  
Lee, Joon-Ho

### 1. 서론

1994년 미국 Northridge 지진 이후 성능 기반 내진 설계(Performance-Based Seismic Design, PBSD)가 도입되었다. 이에 따라 현행 내진 설계 기준에서는 설계 하중 수준의 지진에 대해 구조물의 비탄성 거동을 허용하고 있다. 성능 기반 내진 설계는 설계자가 미리 설정한 내진 성능 목표를 만족하도록 구조 설계를 수행하며, 일반적으로 두 가지 이상의 내진 성능 목표를 설정한다. 구조물의 중요도에 따라 인명 안전(Life Safety)이나 붕괴 방지(Collapse Prevention) 수준과 같은 내진 성능 목표를 설정하며 비선형 동적 해석을 통해 목표 성능을 검증하고 보강 설계를 수행한다.

내진 성능 목표를 설정함에 있어 구조 기술자에게 익숙한 층간 변위와 같은 물리량을 사용하는 대신 건축주 및 건축물의 사용자가 쉽게 이해할 수 있는 지표를 사용하는 차세대 성능 기반 내진 설계 방

법론이 FEMA 445<sup>1)</sup>에 제시되었다. 이후 ASCE에서는 거주 회복성에 중점을 둔 Resilience Based Performance Design 방법론을 제시하여 구조물의 목표 성능이 인명 안전으로 설계되어도 지진 피해 이후 복구 비용과 기간에 중점을 둔 설계법을 제시하였다.

본 기사에서는 지진 취약도 분석과 지진 피해에 의한 손실 평가에 대한 방법론을 간략히 소개하고 예제 구조물을 통해 실제 복구 비용을 평가하였다.

### 2. 확률론적 지진 취약도 분석

일정한 강도의 지진이 발생할 경우 구조물의 내진 성능을 평가하기 위하여 구조물에 손상이 발생할 확률을 나타내는 지진 취약도 함수가 사용된다. 일정 지진 강도에 해당하는 많은 수의 지진 데이터를 이용하여 비선형 동적 해석을 수행함으로써 손상 확률을 구하고, 다시 지진 강도를 증가시켜 비선형 동적 해석을 수행하는 방법을 반복 적용함으로써 구하고자 하는 지진 강도 범위 내에서 지진 취약도 함수를 결정할 수 있다. 취약도 해석을 통해 지

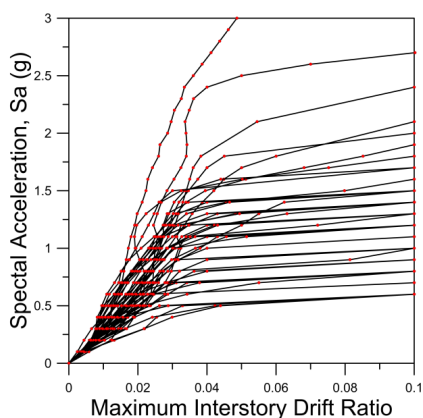
\* 서일대학교 건축공학과 조교수, 공학박사  
Architectural Engineering, Seoil University

진에 의한 구조물의 피해 상태가 일정 수준을 넘는 확률을 결정할 수 있어 내진 성능을 정량적으로 평가할 수 있다. 지진 취약도는 일정 지진 강도에 대한 구조물의 손상 확률을 조건부 함수로 표현하며 다음 식과 같다.

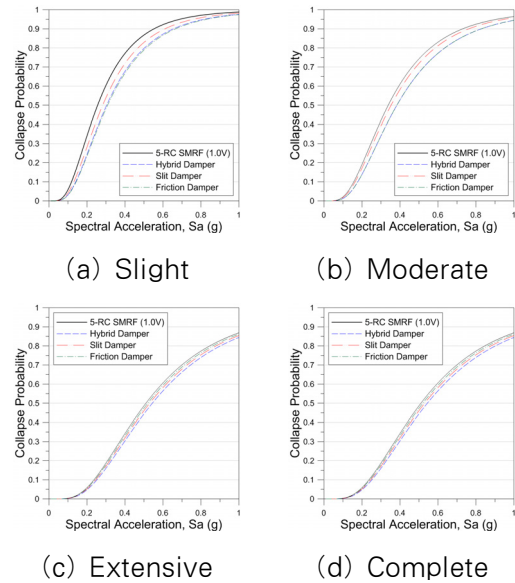
$$P[C < D | SI = x] = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln(\hat{C}/\hat{D})}{\sqrt{\beta_{D|SI}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $\Phi[ ]$ 은 표준 정규 분포의 면적(Standard normal probability integral),  $\hat{C}$ 는 22개의 지반 가속도에 대해서 예제 구조물에 동적 불안정을 유발하는 지진 기록의 가속도( $\hat{S}_{CT}$ ),  $\hat{D}$ 는 구조물의 소요 스펙트럼 가속도,  $\sqrt{\beta_{D|SI}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}$ 는 전체 시스템 불확실성( $\beta_{TO}$ )이다.

구조물의 한계 상태는 HAZUS에서 전반적인 피해 상황을 평가하기에 적합하도록 제시한 Slight, Moderate, Extensive, Complete의 4단계 손상 상태를 차용한다. 철근 콘크리트 구조물의 경우 Slight는 일부 부재에 미세 균열이 발생한 상태, Moderate는 전반적으로 균열이 발생하고 일부 부재가 항복하는 상태, Extensive는 일부 부재가 극한 상태에 도달한 상태, Complete는 구조물이 붕괴하거나 붕괴 직전인 상태를 나타낸다. <Fig. 1>과 <Fig. 2>는 예제 구조물의 증분 동적 해석 결과를 바탕으로 산정한 지진 취약도 곡선의 예시이다.



<Fig. 1> IDA result



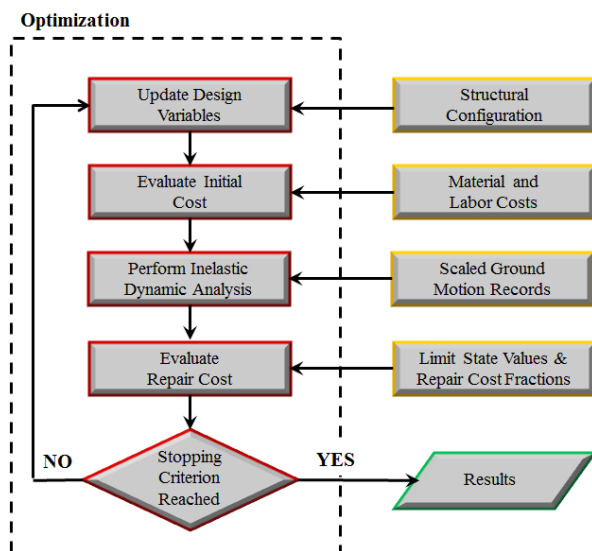
<Fig. 2> Seismic fragility curve

### 3. 예상 보수 비용 분석

예상 보수 비용 산정을 위한 지표로는 지진으로 인한 구조체, 비구조체 및 구조물 내 내용물의 손실 금액, 인명 피해, 영업 정지 일수, 영업 손실 등을 사용한다. FEMA P-58<sup>2)</sup>에서는 McGuire(2004), Moehle & Deierlein(2004), Abrahamson & Atik(2010)의 연구 결과<sup>3-5)</sup>를 바탕으로 차세대 내진 성능 평가 방법론을 활용한 ‘Performance Assessment Calculation Toll Ver. 2.9.65, PACT’가 개발되었다. PACT는 지진으로 인한 구조물의 손실 평가를 위한 성능 평가 방법론에 근거한다. 지진으로 인한 손실은 구조물의 지진 취약도 곡선을 통해 평가한다. 취약도 곡선은 FEMA P695의 방법론에 따라 증분 동적 해석을 수행하고 지진 강도에 따른 구조물의 응답에 대해 특정 손상을 초과할 확률을 통해 나타낸다.

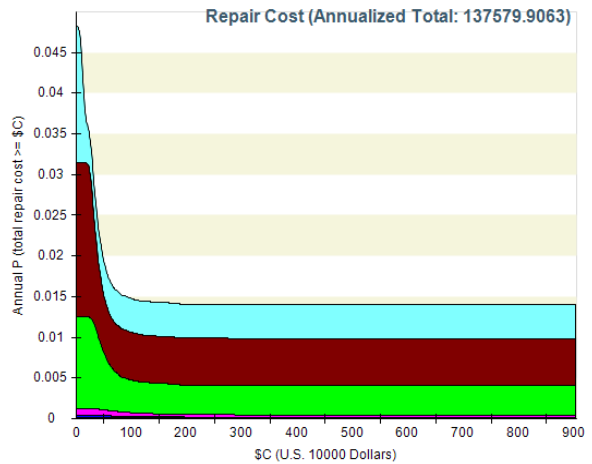
FEMA P-58은 취약도 곡선을 도출하여 특정 손상을 초과할 확률을 산정하기 위해 FEMA P695의 방법론에 따라 증분 동적 해석을 수행하고 손상 평가를 수행할 것을 권장하고 있다. 즉 사용자가 정의한 구조물의 붕괴 취약도 함수를 이용하여 피해 발생에 대한 평가를 진행한다.

지진 해석은 PEER NGA Database의 지진 기록을 이용하여 해당 구조물의 증분 동적 해석을 수행하고 IDA 곡선상에서 동적 불안정이 발생하는 지점을 한계 상태로 규정한다. 한계 상태에 해당하는 가속도를 이용하여 스펙트럼 응답 가속도의 중앙값( $\hat{S}_a(T)$ )과 붕괴와 관련된 불확실성( $\beta$ )을 정의한다. 구조물의 성능 평가 유형은 크게 시나리오, 강도, 특정 기간 기반 성능 평가로 구분된다. 강도(Intensity)는 총 8개로 나누어 설계 지역의 재현 주기별 지진 강도와 연간 초과 확률을 정의하고 층간 변위, 층 가속도, 잔류 변형을 입력하여 손실 평가 수행하였다. FEMA P-58에 제시된 손상 비용 평가 절차를 <Fig. 3>에 도식화하였다.

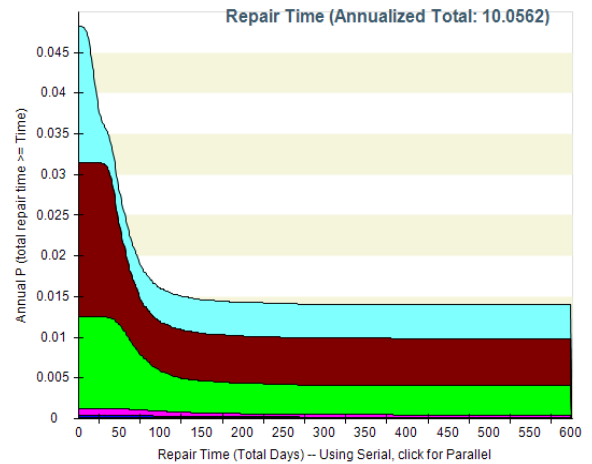


<Fig. 3> Evaluation procedure

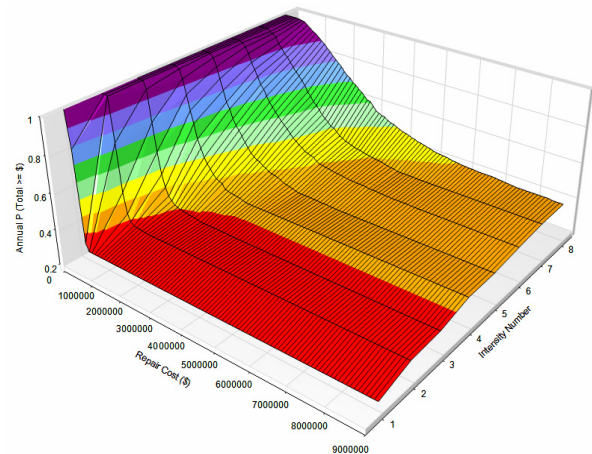
PACT 프로그램을 이용하여 예제 구조물의 손상 비용과 보수 기간을 평가한 결과를 <Fig. 4~6>에 나타내었다. 예제 구조물은 3층 철근 콘크리트의 보통 모멘트 골조이다. 지진 하중 시나리오에 따라 연간 복구 비용은 \$137,500로 초기 공사 비용의 1.52%이다. 복구 기간은 연간 10일이며 지진 발생 확률, 복구 비용, 지진 강도의 상관 관계 그래프는 <Fig. 6>과 같이 나타낼 수 있다.



<Fig. 4> Repair cost



<Fig. 5> Repair time



<Fig. 6> Repair cost curve

## 4. 결론

본고에서는 증분 동적 해석에 의한 확률론적 지진 취약도 분석 방법과 FEMA P-58에 제시된 손실 비용 평가를 소개하였다. 취약도 분석은 지진으로 인해 구조물에 손상이 발생할 확률을 나타내며, 구조물의 내진 성능을 평가하는데 사용된다. 중요도가 높은 구조물이나 내진 성능 계수가 정립되지 않는 새로운 구조 시스템의 분석에 주로 사용되며 최근 컴퓨터 사양이 높아지면서 많이 적용되고 있다. FEMA P-58은 지진으로 인한 구조체, 비구조체 및 구조물 내 내용물의 손실 금액, 인명 피해, 영업 정지 일수, 영업 손실 등을 고려하여 총 복구 비용과 기간을 PACT 프로그램을 이용하여 산정한다. 해당 프로그램은 미국 실정에 대한 비용으로 구성되어 있으나 이미 국산화 및 국내 통합 지진 대응 시스템에 적용되어 있다. 두 방법론의 제시 이후 지진 피해에 대한 복구 비용 뿐만 아니라 거주자 및 피해 구조물의 정상화에 필요한 기간 등 삶의 질을 고려한 방법론이 제시되어 내진 설계에 적용되고 있다. 앞서 소개한 평가법을 통해 국내 시설물 내진 설계 방법론의 발전과 연구에 도움이 되고자 한다.

Engineering, Canada

5. Abrahamson, N. A., & Atik, L. (2010). Scenario spectra for design ground motions 420 and risk calculation. Proceeding of the 9th US National and 10th Canadian 521 Conference on Earthquake Engineering, Canada

## References

1. FEMA-445. Next Generation Performance Based Seismic Design Guidelines. Federal Emergency Management Agency. 2006
2. FEMA P-58. Seismic Performance Assessment of Buildings: Vol. 1- Methodology. Federal Emergency Management Agency. 2012
3. McGuire, R. K., "Seismic Hazard and Risk Analysis", Earthquake Engineering Research Institute, 2004.
4. Moehle, J., & Deierlein, G. G. (2004). A Framework Methodology for Performance-Based Earthquake Engineering. Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake