

반복지진 시 누적손상을 반영한 효율적인 지진취약도 산정 기법

Efficient Seismic Fragility Assessment Method Considering Cumulative Damage Under Repeated Earthquakes

변영준¹⁾ · 김시영²⁾ · 김정환^{3)*}

Byun, Young Jun¹⁾ · Kim, Si Young²⁾ · Kim, Jung Han^{3)*}

¹⁾부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, ²⁾부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, ³⁾부산대학교 사회환경시스템공학과 부교수

¹⁾Masteral Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, ²⁾ Ph. D Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, ³⁾Associate Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

/ A B S T R A C T /

This study presents a seismic fragility assessment methodology incorporating the cumulative damage effects of repeated seismic loading on structures. Conventional seismic fragility assessment methods typically focus on single earthquakes across multiple structures; however, seismic events often occur in sequences, with each event adding cumulative damage that can amplify the overall damage. Ignoring the effects of repeated earthquakes in fragility assessments may lead to underestimating seismic risk. This study proposes a simplified but efficient fragility assessment method that accounts for repeated earthquake effects using probabilistic combinations of each damage state. This procedure applied the capacity spectrum method to consider capacity degradation from displacement caused by prior earthquakes. Applying various earthquake scenarios, this study analyzes the effects of damage accumulation from earthquake occurrence sequences, structural behavior types, and seismic design levels on the fragility of structures under repeated earthquake events.

Key words: Seismic fragility, Repeated earthquakes, Cumulative damage, Capacity spectrum method

1. 서론

지진취약도를 사용한 구조물 피해 예측은 일반적으로 단일지진과 다수의 구조물을 대상으로 수행된다. 하지만 실제 지진재해는 본진이 발생하기 전이나 후에 전진, 여진을 동반하는 경우가 많다. 다수의 연속적인 지진으로 구성된 지진재해에서 각 지진간의 시간 간격은 구조물의 손상이 복구되기에 짧은 경우가 많다. 손상이 복구되기 전에 추가적인 지진이 발생하면 구조물의 손상이 누적되고 강성과 강도가 감소하게 된다[1]. 구조물의 손상 누적은 이후에 발생할 지진에 대해 구조물의 응답을 증가시키는 요인으로 작용하게 된다[2, 3]. 따라서, 지진취약도 산정 시 반복지진을 고려하는 것이 중요하며 [4], 이로부터 반복지진에 의한 지진위험도 평가가 가능하다.

반복지진에 의한 구조물의 손상을 고려한 지진취약도 산정은 꾸준히 연

구 되었다. H. Ryu et al.[5]은 다수의 지진자료를 수집한 뒤 본진에 의한 구조물의 응답이 동일하도록 본진을 조정하여 본진-여진 과정을 구성했다. 이 본진-여진 과정을 사용하여 증분 동적 해석을 수행하고 본진에 의해 손상을 입은 구조물의 지진취약도를 제시했다. Di Trapani and Malavisi[6]는 본진의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration)가 특정값을 가지는 본진-여진 순서를 적용하여 일반 프레임과 충전재가 있는 프레임의 지진취약도를 제시했다. Raghunandan[7]는 본진과 여진의 연속적인 발생에 대한 위험을 정량적으로 평가했다. 다자유도 모델을 사용해 철근콘크리트 구조물의 건물의 여진 취약성을 분석하고, 본진 손상 수준에 따른 여진 붕괴 역량의 변화를 평가했다.

반복지진에 대한 지진취약도에 대한 많은 연구가 이루어졌음에도 불구하고, 다수의 구조물에 대해 반복지진취약도를 산정하는 과정은 여전히 매우 어렵다. 반복지진취약도는 산정 과정에서 단일지진취약도 산정 과정을 지진 발생 횟수만큼 반복하고, 과정 내에서 각각의 지진에 의한 누적손상을 고려해야 한다. 이 과정에서 각각의 지진에 대한 구조물의 누적손상을 고려하지 않는다면 반복지진취약도는 온전한 구조물의 단일지진취약도의 곱사건으

*Corresponding author: Kim, Jung Han

E-mail: jhankim@pusan.ac.kr

(Received November 15, 2024; Revised December 9, 2024; Accepted December 9, 2024)

로서 일정부분 예측할 수 있다. 하지만 각 지진으로 인해 구조물 손상이 발생할 수밖에 없으므로 온전한 구조물의 임계값, 연성 계수, 고유 주기 등의 특성 값을 적용할 수 없게 된다. 반복지진취약도를 산정하기 위해서는 손상된 구조물에 맞는 특성값을 알아야 한다는 것이다. 이 특성값은 구조물에 발생한 손상의 수준과 특성에 따라 변하게 된다. 그러나 지진위험도 평가와 같이 주어진 지진 사건에 의한 다수의 구조물의 손상 평가를 하는 경우 모든 구조물과 여러 순차 지진 조합에 대해 구조해석을 수행하여 손상된 구조물의 특성값을 계산하는 것은 사실상 불가능하다.

본 연구는 이러한 한계를 해결하기 위해 기존의 구조해석 기반 접근 방식이 아닌, 확률조합과 변위기반해석법을 사용한 비교적 단순화된 반복지진취약도 산정 방법을 제시한다. 해당 방법은 지진취약도곡선과 ATC-40[8]에서 제시하는 역랑스펙트럼법을 사용하여 구조물의 손상이 고려된 손상확률을 각각의 지진마다 계산하고, 계산된 손상확률을 조합하여 반복지진에 의한 최종적인 손상확률을 결정한다. 또한 다양한 지진 시나리오를 통해 지진취약도 산정법에서 반복지진, 지진발생순서, 구조물의 거동 유형 및 내진설계 수준이 미치는 영향을 분석한다.

2. 반복지진취약도

2.1 지진취약도곡선

지진취약도곡선은 지진하중에 의해 구조물 혹은 시스템이 특정 손상상태를 초과할 확률을 나타내는 곡선이다. 본 연구에서는 미국연방재난관리청 FEMA(Federal Emergency Management Agency)의 자연재해 분석 프로그램 HAZUS의 방법론을 적용했으며, HAZUS Earthquake Model Technical Manual[9]에서 제시한 지진취약도곡선 식 (1)을 사용했다.

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \tag{1}$$

여기서, ds 는 손상상태(Damage State)를 의미하며 HAZUS는 손상상태를 손상정도에 따라 Slight, Moderate, Extensive, Complete 네 가지로 구분한다. Table 1은 HAZUS에서 제시하는 Concrete moment frame의 손상상태에 대한 정의이다. $\bar{S}_{d,ds}$ 는 구조물이 손상상태에 도달하는 스펙트럼

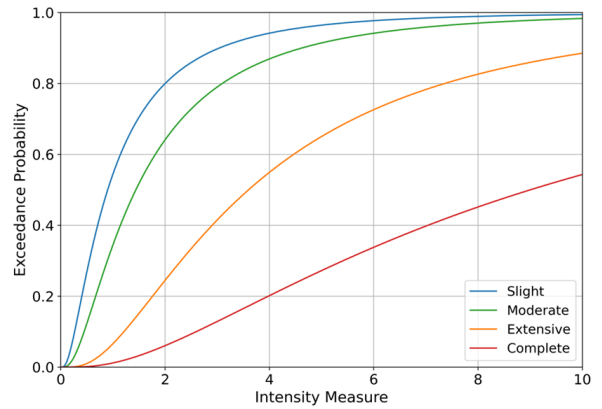


Fig. 1. Seismic fragility curve

변위(Spectral Displacement) 임계값의 중앙값을 의미한다. β_{ds} 는 ds 의 자연로그 표준편차이며 손상상태의 불확실성을 나타내고 지진취약도곡선의 기울기에 영향을 미친다. S_d 는 지진하중에 의해 구조물에 발생하는 스펙트럼 변위를 의미하며 변위기반 지진취약도 곡선에서는 지진세기를 나타내는 지표이다. 지진세기를 나타내는 IM(Intensity Measure)은 평가대상에 따라 달라질 수 있으며, 스펙트럼 변위, 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration), 최대지반가속도 등을 사용할 수 있다. HAZUS는 구조요소를 평가할 때 스펙트럼 변위를 사용한다. Fig. 1은 식 (1)을 사용하여 작성한 손상상태별 지진취약도곡선의 예시이다.

2.2 구조 유형

지진하중에 의한 구조물의 피해 예측은, 평가 대상 구조물 각각의 특성을 고려하여 수행하는 것이 아니라 다수의 구조물을 구조 유형으로 분류한 뒤 구조 유형에 대해 수행된다. 연구 대상으로 선정된 구조 유형은 철근콘크리트 저층 구조물이다. 철근콘크리트 저층 구조물은 주거 밀집 지역에 집중적으로 건설되어 지진 방재를 위한 위험도 평가가 필요하지만, 상대적으로 중요 구조물은 아니어서 상세 내진설계 관심 대상이 아니었다. 그러나 최근의 국내 지진 시 실제 피해가 다수 발생하여 예제 모델로 선정했다. 본 연구는 HAZUS에서 철근콘크리트 구조물을 의미하는 C1과 1~3층의 저층 구조물을 의미하는 L을 조합한 CIL의 데이터를 사용했다.

Table 1. Damage states for concrete moment frame[9]

Damage state	Description
Slight	Flexural or shear type hairline cracks in some beams and columns near joints or within joints.
Moderate	Most beams and columns exhibit hairline cracks. In ductile frames, some of the frame elements have reached yield capacity, as indicated by larger flexural cracks and some concrete spalling. Nonductile frames may exhibit larger shear cracks and spalling.
Extensive	Some of the frame elements have reached their ultimate capacity, as indicated in ductile frames by large flexural cracks, spalled concrete, and buckled main reinforcement; nonductile frame elements may have suffered shear failures or bond failures at reinforcement splices, broken ties or buckled main reinforcement in columns which may result in partial collapse.
Complete	Structure is collapsed or in imminent danger of collapse due to brittle failure of nonductile frame elements or loss of frame stability. Approximately 13% (low-rise), 10% (mid-rise) or 5% (high-rise) of the total area of C1 buildings with Complete damage is expected to be collapsed.

2.3 내진설계 수준

내진설계 수준은 지진취약도평가를 수행할 구조물의 내진설계 수준을 의미한다. 내진설계 수준이 높아질수록 구조물의 $\bar{S}_{d,ds}$ 값이 감소하고 역랑곡선이 커지게 되어 지진하중에 대한 구조물의 응답과 손상상태를 낮게 평가하게 된다. HAZUS는 지진구역과 구조물의 건설년도에 따라 7단계의 내진설계 수준을 사용한다. 내진설계 수준은 Pre, Low, Moderate, High, Special Low, Special Moderate, Special High로 이루어져있고, FEMA의 Building Codes Save[10]는 고위험 지역 건물을 위한 Very High, Severe 내진설계 수준을 제시했다. 일반적으로 7단계 중 Pre에서 High 총 4단계를 사용한다. 국내의 내진설계 수준은 소방방재청의 지진피해 취약도합수국산화 연구[11]에서 개발되었다. 해당 연구는 HAZUS 방법론 기반으로 수행되어 HAZUS 내진설계 수준과 유사한 Pre, Low, Moderate, High 4단계의 내진설계 수준을 제시한다. 본 연구는 HAZUS의 High, Low 내진설계 수준을 선정하여 수행했다.

2.4 단일지진 손상확률

단일지진 손상확률은 지진취약도곡선과 지진하중에 의해 발생한 구조물의 응답을 통해 계산할 수 있다. 지진취약도곡선은 구조물 유형, 내진 성능 수준, 내진설계 수준을 고려하여 결정된다. 본 연구에서 구조물의 응답은 역랑스펙트럼법을 사용하여 계산했다. 역랑스펙트럼법에 대해서는 3장에서 서술한다. 각 손상상태에 해당하는 손상확률 계산식은 식 (2)에 제시되어있다. Fig. 2는 식 (2)의 계산결과를 취약도곡선 위에 나타낸 것이다.

$$P[ds = No\ damage] = 1 - P[ds > Slight] \tag{2}$$

$$P[ds = Slight] = P[ds > Slight] - P[ds > Moderate]$$

$$P[ds = Moderate] = P[ds > Moderate] - P[ds > Extensive]$$

$$P[ds = Extensive] = P[ds > Extensive] - P[ds > Complete]$$

$$P[ds = Complete] = P[ds > Complete]$$

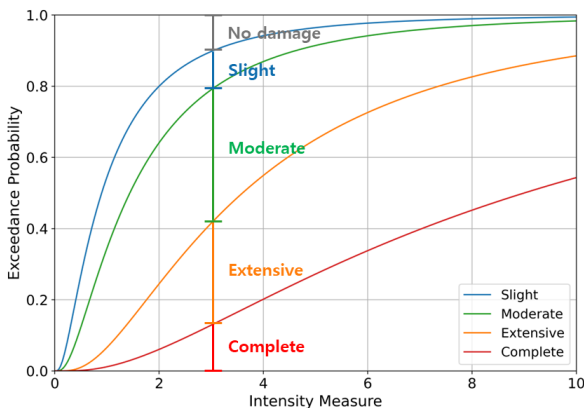


Fig. 2. Probability by damage state

2.5 반복지진 손상확률

식 (3)을 통해 단일지진에 의해 계산된 손상확률을 조합하여 반복지진 손상확률을 계산할 수 있다. 구조물에 반복지진이 발생한다면 마지막 지진에 의해 구조물에 발생한 손상상태는 직전 지진까지에 의한 손상상태와 같거나 심화될 것이다. 따라서 이후에 발생한 지진의 손상상태는 직전까지 발생한 지진에 의한 손상상태를 포괄해야 한다. 초기지진에 의한 손상확률을 다음 지진에 의한 손상확률과 조합하고 과정을 반복함으로써 다수의 반복지진에 의한 손상확률을 계산할 수 있다. 식 (3)을 통해 산정된 확률은 임의의 연속된 지진에 의해 특정 손상상태가 발생할 확률을 의미한다.

$$P[ds = No\ damage] = \sum_{ds = No\ damage}^{No\ damage} P[No\ damage_{i+1} | ds_i] + \sum_{ds = No\ damage}^{No\ damage} P[ds_{i+1} | No\ damage_i] - P[No\ damage_{i+1} | No\ damage_i] \tag{3}$$

$$P[ds = Slight] = \sum_{ds = No\ damage}^{Slight} P[Slight_{i+1} | ds_i] + \sum_{ds = No\ damage}^{Slight} P[ds_{i+1} | Slight_i] - P[Slight_{i+1} | Slight_i]$$

$$P[ds = Moderate] = \sum_{ds = No\ damage}^{Moderate} P[Moderate_{i+1} | ds_i] + \sum_{ds = No\ damage}^{Moderate} P[ds_{i+1} | Moderate_i] - P[Moderate_{i+1} | Moderate_i]$$

$$P[ds = Extensive] = \sum_{ds = No\ damage}^{Extensive} P[Extensive_{i+1} | ds_i] + \sum_{ds = No\ damage}^{Extensive} P[ds_{i+1} | Extensive_i] - P[Extensive_{i+1} | Extensive_i]$$

$$P[ds = Complete] = \sum_{ds = No\ damage}^{Complete} P[Complete_{i+1} | ds_i] + \sum_{ds = No\ damage}^{Complete} P[ds_{i+1} | Complete_i] - P[Complete_{i+1} | Complete_i]$$

여기서, ds_i 는 임의의 연속된 지진 중 먼저 발생한 지진으로 인한 구조물의 손상상태를 의미하며, No damage부터 계산하고 싶은 손상상태까지 순차적으로 대입한다. ds_{i+1} 는 임의의 연속된 지진 중 나중에 발생한 지진으로 인한 구조물의 손상상태를 의미하며, No damage부터 계산하고 싶은 손상상태까지 순차적으로 대입한다. 반복지진 손상확률은 전체 지진사건에 의해

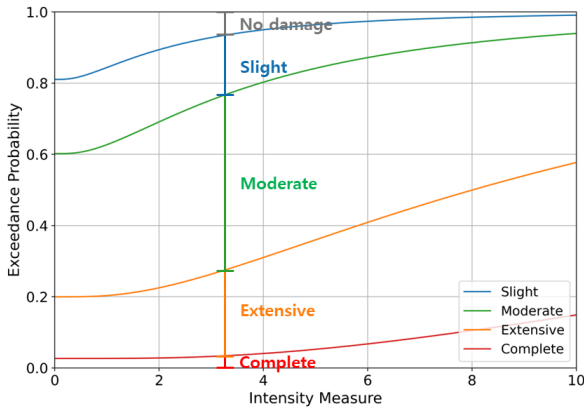


Fig. 3. Probability by damage state (Subsequent earthquake)

발생하는 구조물의 손상 중 1회 이상 목표 손상상태가 발생하고 나머지 지진이 목표손상상태와 동일하거나 작은 손상을 발생시킬 확률을 의미한다. 반복지진에 의해 Slight 손상이 발생할 확률을 산정하는 과정을 예시로 식 (3)을 설명하면, 후속지진에 의해 Slight 손상이 발생하고 초기지진에 의해 No damage, Slight 손상이 발생할 확률을 계산한다. 후에 초기지진에 의해 Slight 손상이 발생하고 후속지진에 의해 No damage, Slight 손상이 발생할 확률을 계산하고 모든 확률을 더해준 뒤, 중복되는 사건의 확률을 제거하면 반복지진에 의해 Slight 손상이 발생할 확률을 산정할 수 있다. Fig. 3은 식 (3)을 이용하여 계산된 반복지진취약도를 그래프로 나타낸 것이다. 반복지진취약도의 특징은 앞서 발생한 지진의 손상확률을 포함하고 있어 후속지진이 아무리 작은 세기라도 직전 지진까지의 손상이 있기 때문에 0의 지진세기에서도 손상확률이 0이 아닌 값을 가지게 되며 해당 값은 직전 지진까지에 의한 손상확률이다.

3. 역량스펙트럼법

지진하중에 의한 구조물의 응답을 산정하기 위해 ATC-40에서 제시하는 역량스펙트럼법을 사용했다. 역량스펙트럼법은 구조물의 역량을 나타내는 역량곡선과 지진하중에 의해 발생한 요구스펙트럼을 동일한 좌표축에 나타내 구조물의 거동을 하나의 그래프에서 평가할 수 있는 변위기반해석법의 일종이다. 응답스펙트럼은 일반적으로 x축에 주기 혹은 진동수를 사용하고 y축에는 응답을 사용한다. 역량곡선의 x축은 구조물에 발생한 변위이고 y축은 구조물에 발생한 힘을 사용한다. 때문에 역량곡선과 응답스펙트럼은 기본 상태로는 직접적으로 비교할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해 응답스펙트럼과 역량곡선이 같은 좌표축을 가지도록 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum) 형태로 변환한다. 해당과정을 통해 응답스펙트럼을 역량곡선과 동일한 좌표축 위에서 비교할 수 있게 된다. ATC-40의 역량스펙트럼법은 가정 정도에 따라 A, B, C 세 가지가 제시된다. A는 가장 명확하고 직접적인 방법이며 프로그래밍에 편리한 방법, B는 A에 비해 단순화되어있고 프로그래밍에 가장 편리하지만 가정된 부분에 대해서 충분한 이해가 필요한 방법, C는 직접 수식으로 계산하기에 유리하지만 프로그래밍하기에 부적합하고 가정이 가장 많은 방법이다. 본 연구에서는 A방법을 사용했다.

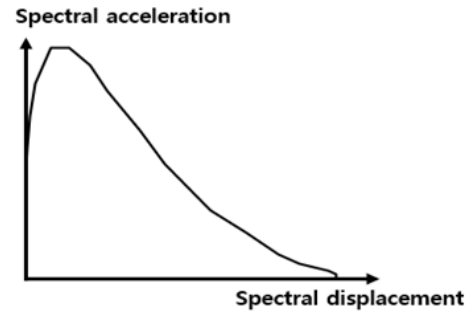


Fig. 4. Demand Spectrum

3.1 요구스펙트럼

요구스펙트럼은 구조물에 지진하중이 가해질 때 발생하는 응답을 나타내며, 일반적으로 설계응답스펙트럼으로 작성된다. 하지만 본 연구에서는 현실적인 지진요구 반영을 위해 지진 시나리오와 지진동감쇄식을 이용하여 요구스펙트럼을 작성했다. 지진동감쇄식은 Abrahamson and Silva[12]가 제시한 Abrahamson & Silva 2008식을 사용했다. Fig. 4는 Abrahamson & Silva 2008식을 사용하여 특정 규모-거리에 대한 응답스펙트럼을 구성하고 이를 ADRS 형태의 요구스펙트럼으로 변환한 것이다. 규모-거리에 따른 주기별 감쇄식을 대입해야 하므로 이 스펙트럼 형상은 구조물의 위치와 지진의 규모에 따라 항상 달라지게 된다. 또한 응답스펙트럼의 x축을 Spectral displacement로 변환하였기 때문에 주기가 무한대인 구조물에 해당하는 경우 응답은 지진파의 지반변위와 같을 것이며 이는 이 요구스펙트럼에서 x축 절편에 해당하게 된다.

3.2 역량곡선

구조물의 지진하중에 대한 저항 역량을 나타내는 역량곡선은 힘 - 변위관계로 표현된다. 역량곡선은 푸쉬오버해석 또는 유사정적 실험을 통해 얻을 수 있다. 본 연구에서는 HAZUS에서 제시하고 있는 C1 구조 유형의 항복점과 극한점 값을 이용하여 역량곡선을 구성했다. 역량곡선을 결정하기 위해서는 구조물의 유형, 내진설계 수준이 필요하다.

3.3 수정역량곡선

단일지진이 아닌 반복지진을 고려할 때, 먼저 발생한 지진에 의해 발생한 구조물의 손상은 가장 중요한 고려 요소 중 하나이다. 손상을 입은 구조물과 손상을 입지 않은 구조물은 동일한 구조물일지라도 다른 역량곡선을 가질 것이다. FEMA-306[13]은 구조물의 손상에 대한 역량곡선의 변화를 고려하기 위해 부재마다 역량곡선수정계수를 제시한다. 본 연구는 지진하중에 의해 구조물의 비교적 약한 기동에 대각 인장력이 발생하는 경우의 역량곡선수정계수를 이용하여 수정역량곡선을 제작했다. Table 2에 역량곡선수정계수에 대해 정리했다. FEMA-306에서 사용한 역량곡선수정계수의 손상상태 체계는 HAZUS 체계와 다르지만 두 체계 모두 4단계로 이루어져 있다. HAZUS에서 제시하는 손상상태 임계점 값과 FEMA-306의 손상상태 단계를 일대일 대응시킨 뒤, 선형보간 하여 초기지진에 응답에 따른 역량곡선

Table 2. Capacity curve modification factor

Damage state	Insignificant	Slight	Moderate	Heavy	Extreme
Stiffness	0.9	-	0.5	0.2	0
Strength	1.0	-	0.8	0.3	0
DAL*	1.0	-	0.9	0.7	0

DAL*: Deformation Acceptability Limits

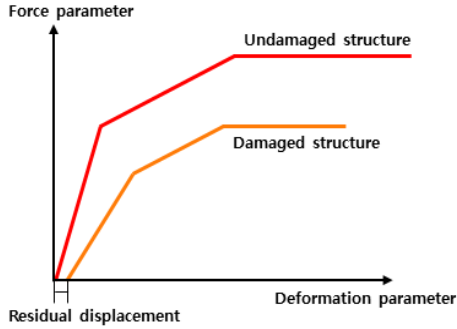


Fig. 5. Capacity curve of a damaged structure

수정계수를 산정했다.

수정역량곡선을 작성하기 위해서는 역량곡선수정계수 뿐만 아니라 잔류 변위도 고려해야한다. 하지만 ATC-40에서 제시된 역량스펙트럼법은 역량 곡선이 원점에서 시작하지 않은 경우에 대해서 바로 적용할 수 없다. 잔류변위 가 이미 발생한 상태에서 지진에 의한 추가되는 변위는 역량스펙트럼법을 통해서 부호를 알 수 없으므로 보수적으로 잔류변위가 없는 상태에서 역량스펙트럼법을 통해 응답을 계산한 후 잔류변위를 더하는 것으로 고려했다. 잔류 변위는 Muberra and Cem[14]이 제시한 식 (4)와 (5)로부터 구해진다. Fig. 5에서는 역량곡선수정계수와 잔류변위에 의한 역량곡선의 변화를 나타냈다.

$$D_{res} = \beta \cdot S_d \tag{4}$$

$$\beta = (a + b\mu + c\alpha + d\mu T + e\mu\alpha + f\mu\alpha^2) \tag{5}$$

식 (4)의 D_{res} 는 잔류변위비율 β 와 응답(변위) S_d 을 곱하여 산정된 잔류 변위를 의미한다. 식 (5)에서 잔류변위비율 β 를 계산하는 과정에 사용된 계 수 $a \sim f$ 의 값은 Table 3에 정리했다. μ 는 구조물의 연성계수이다. 연성계수는 구조물의 비탄성 변형 능력을 나타내는 계수이다. 이는 구조물이 탄성 한 계를 넘어서 후, 변형을 버티며 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 나타낸다. 본 연구에서는 HAZUS에서 제시하고 있는 C1L 구조 유형의 연성계수를 사용했다. α 는 항복 후 강성비이다. 항복 후 강성비는 항복 후 강성을 초기강 성으로 나눈 값이다. 항복 후 강성은 구조물이 항복한 뒤 극한지점에 도달하 기까지의 강성을 의미한다. 항복 후 강성비는 항복점에서 극한점까지의 기 울기를 통해서 계산 할 수 있다. T 는 구조물의 고유주기를 의미한다.

3.4 구조물 비선형성

구조물의 감쇠는 구조물이 가지고 있는 점성감쇠와 이력감쇠를 더하여

Table 3. Residual displacement factor

Model	a	b	c	d	e	f
MC / FN*	0.096	0.0374	0.0065	-0.0013	-0.0054	0.00015

MC / FN*: Modified-Clough model, Far-Near record

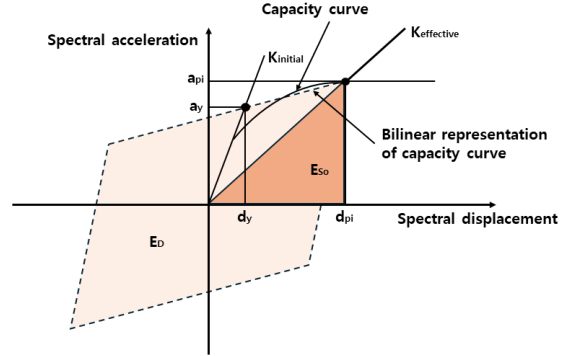


Fig. 6. Idealized capacity curve

산정할 수 있다. 이력감쇠는 구조물의 이력곡선을 이용하여 계산된다. 점성 감쇠에 5% 감쇠비를 대입하면 등가점성감쇠 β_{eq} 는 식 (6)의 형태로, 이력 감쇠 β_0 는 식 (7)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05 \tag{6}$$

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \tag{7}$$

여기서, E_D 는 감쇠에 의한 소산 에너지, E_{S0} 는 최대 변형에너지를 의미한다. 역량곡선을 이선형 형태로 이상화하면 이력감쇠는 식 (8)의 형태로 표현할 수 있다. Fig. 6에 이상화된 역량곡선을 나타냈다.

$$\beta_0 = \frac{0.637(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} \tag{8}$$

여기서, (d_y, a_y) 는 항복점, (d_{pi}, a_{pi}) 는 역량스펙트럼을 통해 결정된 i번째 응답을 의미한다. ATC-40에서는 이러한 이상화된 이력곡선을 사용하여 등 가점성감쇠를 결정할 시 구조물의 감쇠 수준의 과대평가를 방지하기 위해 감 쇠수정계수 κ 를 사용한다. 식 (9)는 감쇠수정계수 κ 를 반영한 등가점성감 쇠 β_{eff} 계산식이다.

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 0.05 \tag{9}$$

감쇠수정계수는 구조물 거동 유형에 따라 계산 방식이 달라진다. 구조물 의 거동 유형은 평가에 사용되는 지진의 지속 시간과 구조물 상태에 따라 결 정된다. 지진 지속 시간이 짧고 내진설계가 잘 되어 있으며 최근에 건설된 구 조물은 ‘A’로, 반대의 경우에는 ‘C’로 간주한다. 감쇠수정계수 계산식은 Table 4를 따른다.

이력감쇠와 감쇠수정계수가 결정되면 등가점성감쇠가 결정되고, 스펙트

Table 4. Hysteretic damping modification factor(ATC-40)

Structural behavior type	β_0 (%)	κ
Type A	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Type B	≤ 25	0.67
	> 25	$0.845 - \frac{0.446(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Type C	any value	0.33

림감소계수 SR_A , SR_V 를 계산할 수 있다. SR_A 는 응답스펙트럼의 가속도민감구역에, SR_V 는 속도민감구역에 곱하여 요구스펙트럼을 조정한다. 해당 과정을 통해 구조물의 감쇠 특성, 에너지 소산 능력 등을 요구스펙트럼에 반영한다. 스펙트럼감소계수는 식 (10)과 (11)로 계산할 수 있다.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \tag{10}$$

$$= \frac{3.21 - 0.68 \ln \left[\frac{63.7 \kappa (a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \right]}{2.12}$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \tag{11}$$

$$= \frac{2.31 - 0.41 \ln \left[\frac{63.7 \kappa (a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \right]}{1.65}$$

3.5 역량스펙트럼법을 이용한 구조물 응답 산정

요구스펙트럼과 역량곡선이 주어지면 역량스펙트럼법을 통해 성능점을

산정할 수 있다. 성능점 산정 시, 두 그래프의 교점을 찾는 과정에서 3.4절에서 서술한 구조물의 비선형성을 고려한다. 먼저 초기성능점을 구하고 이를 사용하여 스펙트럼감소계수를 산정하고 요구스펙트럼에 적용하여 요구스펙트럼을 조정한다. 최종성능점은 반복 과정을 통해 조정된 요구스펙트럼과 역량곡선의 교점의 변위 값이 초기성능점의 변위 값의 95%~105% 범위 내에 있을 경우로 결정했다.

3.6 구조물 손상을 반영한 응답 산정

반복지진에 의한 구조물 손상의 영향은 역량스펙트럼법에서 역량곡선 대신 수정역량곡선을 사용함으로써 응답에 고려된다. 역량곡선수정계수는 초기지진의 응답을 기반으로 산정된다. 산정된 역량곡선수정계수는 이후에 발생한 지진에 대한 역량스펙트럼법을 수행할 때 역량곡선에 반영되며, 이를 적용한 응답은 손상이 없는 역량곡선으로부터 계산되는 응답보다는 더 클 것이다.

3.7 반복지진취약도 산정

반복지진취약도 산정의 전체과정을 Fig. 7에 나타냈다. 해당 그림에서 SD_1 는 초기지진에 의해 구조물에 발생한 응답을 의미하고 SD_2 는 이어지는 지진에 의해 구조물에 발생한 응답을 의미한다. 반복지진취약도는 각 지진 사건에 의한 구조물의 손상확률을 산정하고 식 (3)을 통해 조합함으로써 산정된다. 이때, 각 지진 사건에 의한 구조물의 손상확률을 산정할 때 사용된 지진취약도곡선이 동일하더라도 변위기반 지진취약도곡선에서는 손상에 의해 변위가 더 커지게 산정된다면 손상을 입은 구조물의 손상확률을 산정할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 초기지진의 응답에 비례하여 역량곡선수정계수와 잔류변위를 산정하고 이로부터 후속지진의 응답을 산정하는 방법으로 구조물의 손상을 반영했다. 즉, 후속지진의 응답이 초기지진의 응답에 영향을 받기 때문에 초기지진에 의한 응답이 커질수록 후속지진의 손상확률이 더 크게 산정된다.

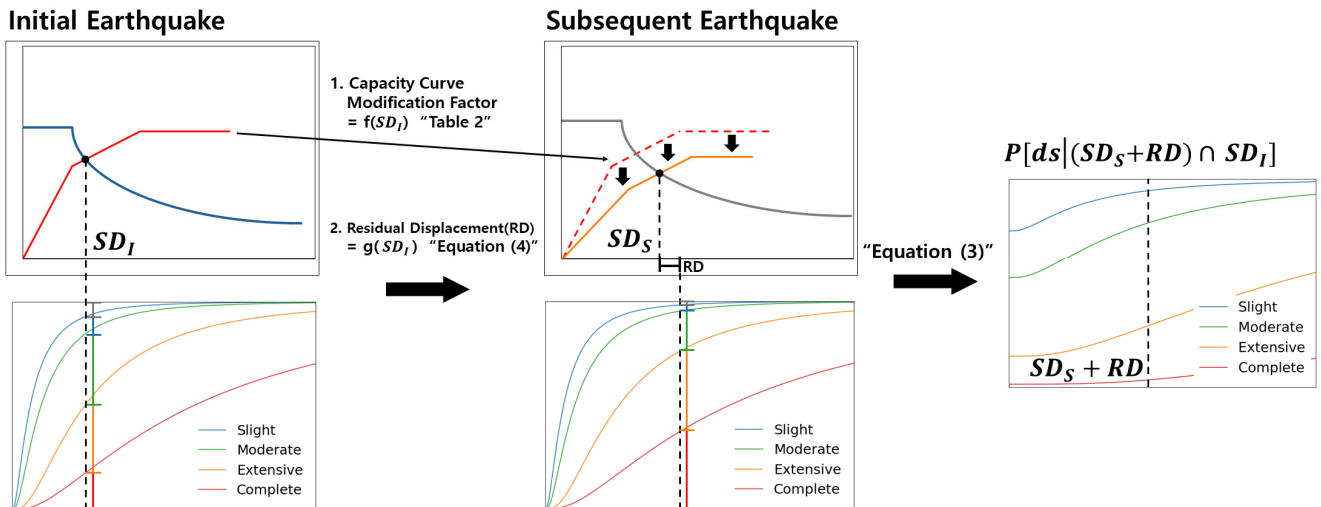


Fig. 7. Procedure for repeated earthquake fragility assessment method

4. 지진 시나리오별 지진취약도

다양한 지진 시나리오를 가정하여 반복지진취약도를 산정했다. 시나리오 1은 규모 6.0의 단일지진 시나리오이다. 본진의 규모가 6.5일 때 발생할 수 있는 여진을 가정했다. 시나리오 2는 한국지질자원연구원의 심부지질환경특성연구[15]에서 제시한 동해남부 지역 최대잠재지진 규모 6.5 ± 0.36 을 참조하여 규모 6.5의 단일지진으로 설정했다. 시나리오 3, 4는 규모 6.5가 2회 반복되는 동일한 구조를 가진다. 이 때, 시나리오 3은 구조물의 손상을 고려하지 않고 시나리오 4는 구조물의 손상을 고려했다. 시나리오 5, 6은 규모 6.5, 6.0 2개의 단일지진의 발생순서를 변경하여 구성했다. 평가에 사용된 지진 시나리오에 대한 정보는 Table 5에 있다. Table 5의 R_{rup} 은 단층 최상단부 거리, R_X 는 진앙거리, Z_{TOR} 는 단층 최상단부 깊이를 의미한다. 각 시나리오별 손상확률은 Tables 6~9과 Figs. 8, 9에 나타냈다.

4.1 반복지진 고려 영향

동일한 규모의 지진으로 구성된 시나리오 2, 3, 4를 통해 지진취약도 산정

Table 5. Earthquake scenarios

Scenario number	Initial earthquake magnitude (M_w)	Subsequent earthquake magnitude (M_w)	Considering damage by initial earthquake	R_{rup} (km)	R_X (km)	Z_{TOR} (km)
1	6.0	-	-	11.2	10	5
2	6.5	-	-			
3	6.5	6.5	X			
4	6.5	6.5	O			
5	6.0	6.5	O			
6	6.5	6.0	O			

시 반복지진과 구조물 손상의 반영 필요성을 확인할 수 있다. 기존 방식을 사용하여 이 세 가지 시나리오를 평가한다면, 가장 큰 본진만을 이용하여 평가를 수행할 수밖에 없어서 시나리오별 차이가 없을 것이다. 시나리오 3은 구조물 손상을 고려하지 않았음에도 단일지진과 비교할 때 Moderate 이상의 손상확률이 크게 증가하는 것을 보인다. 시나리오 3과 시나리오 4를 비교해 보아도 시나리오 3에 비해 Moderate 이상의 손상확률이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 지진취약도 산정 시 구조물 손상을 반영한 반복지진의 고려 필요성을 확인할 수 있다.

4.2 지진발생순서 영향

지진 시나리오 5와 6을 비교하여 지진발생순서가 구조물의 지진취약도에 미치는 영향을 분석했다. 시나리오 5는 작은 규모의 지진이 먼저 발생하고 큰 규모의 지진이 뒤이어 발생하는 시나리오이고, 시나리오 6은 반대로 큰 규모의 지진이 먼저 발생하고 작은 규모의 지진이 발생하는 시나리오이다. 구조물 거동 유형 A, 내진설계 수준 High의 구조물은 시나리오 5의 손상수준이 시나리오 6에서 발생한 손상수준 보다 큰 것을 확인할 수 있다. 반대로 구조물 거동 유형 C, 내진설계 수준 Low의 구조물은 시나리오 6에 의한 손상수준이 시나리오 5의 손상수준보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 지진발생순서에 따른 반복지진 손상확률의 경향성은 찾을 수 없었지만 반복지진을 고려할 때 지진발생순서가 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

4.3 구조물 거동 유형과 내진설계 수준 선택 영향

구조물 거동 유형과 내진설계 수준은 지진취약도에 큰 영향을 미치는 요소이다. Tables 6~9에서 각각의 동일한 시나리오를 비교했을 때, 구조물 거동 유형의 변화보다 내진설계 수준의 변화가 손상확률에 더 큰 영향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 반복지진 손상확률 산정 시 상대적으로

Table 6. Seismic fragility of structure with behavior 'type A' at 'High' seismic design level

Earthquake scenario	Initial earthquake structure response (cm)	Subsequent earthquake structure response (cm)	No-damage (%)	Slight (%)	Moderate (%)	Extensive (%)	Complete (%)
1	0.52	-	96.62	2.89	0.48	0.01	0.00
2	1.91	-	58.78	26.28	13.84	1.08	0.01
3	1.91	1.91	34.55	37.81	25.47	2.15	0.02
4	1.91	3.31	19.04	36.23	38.78	5.81	0.14
5	0.52	2.62	41.85	32.42	23.01	2.67	0.05
6	1.91	1.47	41.57	35.98	20.90	1.55	0.01

Table 7. Seismic fragility of structure with behavior 'type A' at 'Low' seismic design level

Earthquake scenario	Initial earthquake structure response (cm)	Subsequent earthquake structure response (cm)	No-damage (%)	Slight (%)	Moderate (%)	Extensive (%)	Complete (%)
1	1.13	-	77.09	13.07	9.14	0.60	0.10
2	4.28	-	25.46	17.69	38.27	14.38	4.21
3	4.28	4.28	6.48	12.13	47.66	25.49	8.24
4	4.28	7.14	2.94	7.04	40.05	34.74	15.24
5	1.13	4.82	16.66	17.67	42.56	17.58	5.52
6	4.28	3.11	9.49	15.13	48.46	20.81	6.11

Table 8. Seismic fragility of structure with behavior 'type C' at 'High' seismic design level

Earthquake scenario	Initial earthquake structure response (cm)	Subsequent earthquake structure response (cm)	No-damage (%)	Slight (%)	Moderate (%)	Extensive (%)	Complete (%)
1	0.75	-	91.56	6.87	1.53	0.04	0.00
2	3.21	-	33.76	32.56	29.12	4.45	0.12
3	3.21	3.21	11.40	32.58	47.11	8.68	0.24
4	3.21	5.40	4.87	23.08	54.20	16.89	0.96
5	0.75	3.86	23.70	33.37	35.87	6.81	0.25
6	3.21	2.23	17.29	36.00	40.49	6.08	0.14

Table 9. Seismic fragility of structure with behavior 'type C' at 'Low' seismic design level

Earthquake scenario	Initial earthquake structure response (cm)	Subsequent earthquake structure response (cm)	No-damage (%)	Slight (%)	Moderate (%)	Extensive (%)	Complete (%)
1	1.51	-	66.88	16.58	14.84	1.45	0.25
2	5.13	-	19.74	15.76	39.67	18.65	6.17
3	5.13	5.13	3.90	8.71	43.91	31.52	11.96
4	5.13	8.07	1.82	5.01	35.15	38.57	19.45
5	1.51	5.92	10.58	14.31	43.47	23.22	8.42
6	5.13	3.88	5.70	11.13	46.57	27.26	9.34

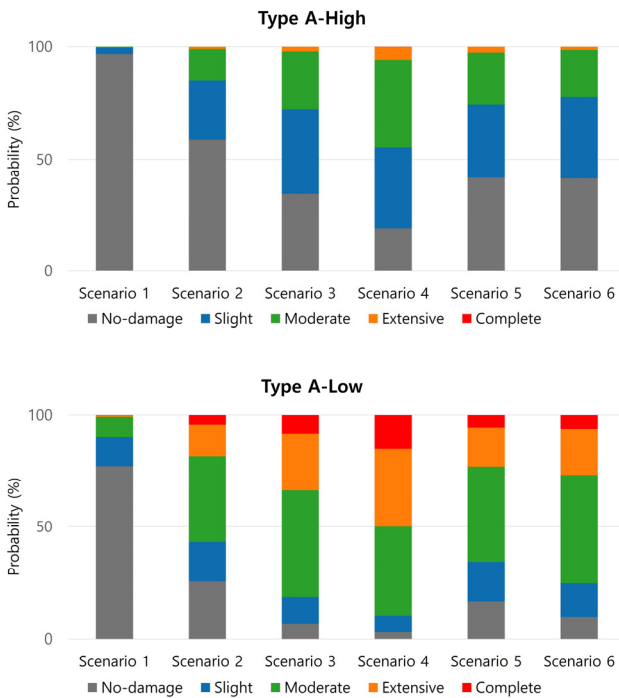


Fig. 8. Seismic fragility by earthquake scenario - Type A

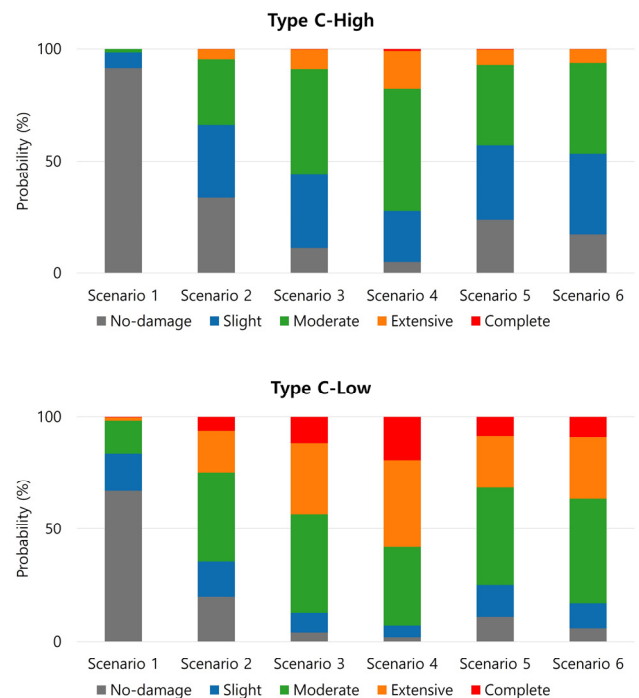


Fig. 9. Seismic fragility by earthquake scenario - Type C

내진설계 수준이 구조물 거동 유형보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단했다. 또한 단일지진만을 고려한 시나리오 2와 반복지진과 구조물 손상을 고려한 시나리오 4를 비교했을 때, 구조물 거동 유형과 내진설계 수준의 영향이 시나리오 2보다 시나리오 4에서 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 반복지진취약도 계산 과정에서 각 지진의 손상확률마다 구조물 거동 유형과 내진설계 수준이 반영되기 때문에 반복지진의 수가 증가함에 따라 그 영향이 더 클 수 있기 때문으로 보인다.

5. 결론

본 연구는 반복지진에 의한 구조물의 누적손상을 반영할 수 있는 반복지진취약도 산정법을 제시한다. 기존 지진취약도 산정법은 반복지진이 발생하더라도 단일지진에 대한 손상확률만을 산정할 수 있는 한계를 가지며, 반복지진 하에서 발생할 수 있는 누적손상과 반복지진의 영향을 충분히 반영하지 못해 구조물의 손상확률을 과소평가하게 된다. 이를 개선하기 위해, 본 연

구에서는 확률조합과 역량스펙트럼법을 사용한 새로운 지진취약도 산정법을 제시한다.

해당 방법론에 단일지진과 반복지진으로 구성된 다양한 시나리오를 적용하여 반복지진, 지진발생순서, 구조물의 거동 유형 및 내진설계 수준이 구조물의 지진취약도에 미치는 효과를 분석했다. 반복지진을 고려했을 때, 기존 지진취약도와 비교해 구조물의 중대한 손상에 해당하는 손상확률을 크게 증가시키는 것을 확인할 수 있었다. 두 번째로 지진발생순서를 고려하여 지진취약도를 산정했을 때, 경향은 확인할 수 없었지만 반복지진취약도가 지진 발생순서에 따라 바뀌는 것을 확인했다. 마지막으로 반복지진취약도 산정법의 계산과정 내의 특성 상 구조물의 거동 유형, 내진설계 수준 또한 단일지진만 고려했을 때와 비교해 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 분석 결과는 지진취약도 산정 시 반복지진, 지진발생순서, 구조물의 거동 유형 및 내진설계 수준을 고려하는 것의 필요성을 보여준다.

본 연구에서 제시한 방법론의 타당성을 평가하기 위해서는 구조해석을 통해 반복지진을 고려한 지진취약도를 이용한 해석결과와 비교하는 과정이 필요할 것이다. 하지만 현재 반복지진취약도 관련 연구 현황을 고려했을 때, 다양한 지진 시나리오와 구조 유형, 다수의 구조물에 대해 수행되는 본 연구의 방법론의 타당성을 평가하기는 현실적으로 어렵다고 판단된다. 추후에 반복지진취약도 연구 사례들이 누적되어 다양한 반복지진 시나리오에 대해 비교할 수 있는 데이터가 확보되면 이 연구에서 제시한 방법론의 타당성을 보다 명확히 입증할 수 있을 것이다. 구조물 보강 상태, 노후화, 재료 특성, 손상 특성 등 누적손상의 세부적인 영향 인자에 대한

구가 수행된다면, 초기지진 응답에 따른 역량곡선수정계수와 잔류변위 산정식을 개선함으로써 더욱 정확한 반복지진취약도 산정이 가능해질 것이다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(GP2021-007)의 지원으로 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

- Hosseinpour F, Abdelnaby AE. Effect of different aspects of multiple earthquakes on the nonlinear behavior of RC structures. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2017 Jan;92(2):706–725.
- Tesfamariam S, Goda K, Mondal G. Seismic vulnerability of RC frame with unreinforced masonry infill due to Mainshock–Aftershock earthquake sequences. *Earthq Spectra*. 2015 Aug;31(3):1427–1449.
- Di Sarno L. Effects of multiple earthquakes on inelastic structural response. *Eng Struct*. 2013 Nov;56:673–681.
- Amadio C, Fragiaco M, Rajgelj S. The effects of repeated earthquake ground motions on the non-linear response of SDOF systems. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2003 Feb;32(2):291–308.
- Ryu H, Luco N, Uma SR, Liel AB. Developing fragilities for mainshock–damaged structures through incremental dynamic analysis. *Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering*; 2011 April 14–16; Auckland, New Zealand; c2011.
- Di Trapani F, Malavisi M. Seismic fragility assessment of infilled frames subject to mainshock/aftershock sequences using a double incremental dynamic analysis approach. *Bull Earthq Eng*. 2018 Aug;17(1):211–235.
- Ragunandan M, Liel AB, Luco N. Aftershock collapse vulnerability assessment of reinforced concrete frame structures. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2015 Mar;44(3):419–439.
- ATC. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume 1 (ATC-40)*. California: Applied Technology Council; c1996. 343 p.
- FEMA. *Hazus 5.1 Earthquake Model Technical Manual*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency; c2022. 224 p.
- FEMA. *Building Codes Save: A Nationwide Study – Losses Avoided as a Result of Adopting Hazard-Resistant Building Codes*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency; c2020. 186 p.
- NEMA. *Development of fragility function of domestic building structures*. Seoul: National Emergency Management Agency; c2009.
- Abrahamson, N, Silva, W. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground–motion relations. *Earthq Spectra*. 2008 Feb;24(1):67–97.
- FEMA. *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings: Basic Procedures Manual*. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency; c1998. 250 p.
- Müberra E, Cem A. Residual displacement demand evaluation from spectral displacement. *Teknik Dergi*. 2019 Mar;30(2):8913–8935.
- KAERI. *Comprehensive Analysis of Neotectonic Movements for Stable Geological Environment Requirements (II)*. Daejeon: Korea Atomic Energy Research Institute; c2005. 67 p.