

구조물의 회복탄력성 기반 성능평가법에 대한 고찰 및 적용 방안에 관한 연구

A Study on the Resilience-Based Performance Evaluation Method of Structures and Their Application Plan

김 유 성*
Kim, Yu-Seong

강 주 원**
Kang, Joo-Won

이 준 호***
Lee, Joon-Ho

Abstract

The resilience performance evaluation method of a structure can evaluate the ability to recover after an earthquake disaster, and this study deals with the consideration and introduction of the resilience performance evaluation method. The resilience evaluation method can be expressed as a quantified number by constructing a loss estimation model and a recovery evaluation model. The recovery evaluation model should consider downtime in addition to the repair time, and the loss estimation model should consider not only direct loss to structures and non-structures, but also indirect loss due to functional loss of the building. In addition, to build a loss estimation model, the structure should be simplified to perform an efficient analysis. Therefore, in this study, the equivalent terminal induction system proposed cantilever-type and rahmen-type SDOF, and it is evaluated somewhat conservatively compared to the example structure, and it is judged that there is a need to improve the hysteresis characteristics by applying the stiffness reduction factor of the SDOF model.

Keywords : Resilience based design, Seismic fragility analysis, SDOF system, Incremental dynamic analysis

1. 서론

현재 건축물의 내진설계기준은 성능기반설계(PBD, Performance Based Design)를 적용하여 지진 재현주기에 따라 건축물의 성능수준(기능수행, 인명보호, 붕괴방지)을 결정하고 있다. 그러나 구조물의 손상을 일부 허용함에 따라 지진 피해 후 구조물의 보수 및 수선의 실행 가능 여부나 재사용에 대해 보장받지 못한다. 이에 따라 건축물이 지진 피해 이전과 같이 회복할 수 있는 복원력을 정량적으로 평가하여 내진설계에 반영하는 회복탄력성 기반 설계(RBD, Resilience Based Design)가 연구되고 있다. 건축에서 회복탄력성(Resilience)은 재난 발생 후 과거의 상태로 빠르게 회복할 수 있는 복구 능

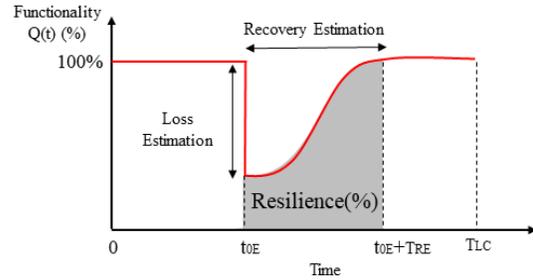
력으로 정의되며, 더 나아가 사회적 시스템의 효과적인 복구 전략을 통해 재난에 대처할 수 있는 능력이다. 회복탄력성 개념을 건축물의 내진성능평가에 적용하면 보수 비용 및 보강 기간 등의 예측을 통해 내진보강 계획 시 효율적이고 경제적인 보강 방법을 결정할 수 있으며, 지진 피해 후 건축물의 기능이 신속히 복구될 수 있도록 구조물 설계를 유도한다.

회복탄력성을 정량적으로 평가하기 위해서는 지진재해 후 구조물의 손실과 복구 기간을 예측하여 평가한다. 지진재해로 인한 손실예측모델은 구조체와 비구조체의 손실, 재해로 인한 인명피해 등 직접적인 손실(Direct loss) 외에 건축물의 사용 불가로 인한 경제적 피해 등 간접적인 손실(Indirect loss)을 포함¹⁾하여야 한다. 복구 기간의 경우 구조체 및 비구조체의 보수 기간(Repair time) 뿐만 아니라 발전 및 수공급 시설의 중단 시간, 보강설계 전 검열 기간, 재설계 기간 등의 지연 요소들이 존재하며, 이에 대한 지연 시간(Downtime)이 포함될 수 있도록 하여야 한다. 이를 위해서는 평가 방법의 정량화와 국내 실정에 맞는 복구 시나리오 데이터베이스

* 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과, 박사과정
Dept. of Architecture, Yeungnam University
** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
*** 교신저자, 정회원, 서일대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
Dept. of Architecture Eng., Seoil University
Tel: 02-490-7427 Fax: 02-490-7808
E-mail: 20190022@Seoil.ac.kr

를 구축하여야 한다. 국외의 경우 회복탄력성 기반 내진 설계방법론이 이미 연구되고 있으며, 지진재해 시나리오 예측을 통해 회복탄력성에 대한 등급을 나누어 건축물의 설계에 반영하고 있다. 그러나 국내에서는 아직 생소한 설계 개념으로 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 회복탄력성 기반 성능평가에 대한 고찰과 손실 예측을 위한 단순화된 단자유도 구조물 해석모델을 제안하여 국내 적용 방안을 모색하고자 한다.



〈Fig. 1〉 Schematics of a functionality function for resilience system

2. 회복탄력성 기반 성능평가 개요

회복탄력성의 개념은 건물 소유자가 지정한 제어 기간(T_{LC})동안 구조물이 재해 이전의 성능수준을 복구할 수 있는 능력이다. Cimellaro, Reinhorn & Bruneau(2010)의 연구에서는 건축물의 정량적인 회복탄력성(Resilience) 평가를 위해 〈Fig. 1〉의 그래프와 식 (1) 및 식 (2)와 같이 수치적으로 평가하였다²⁾.

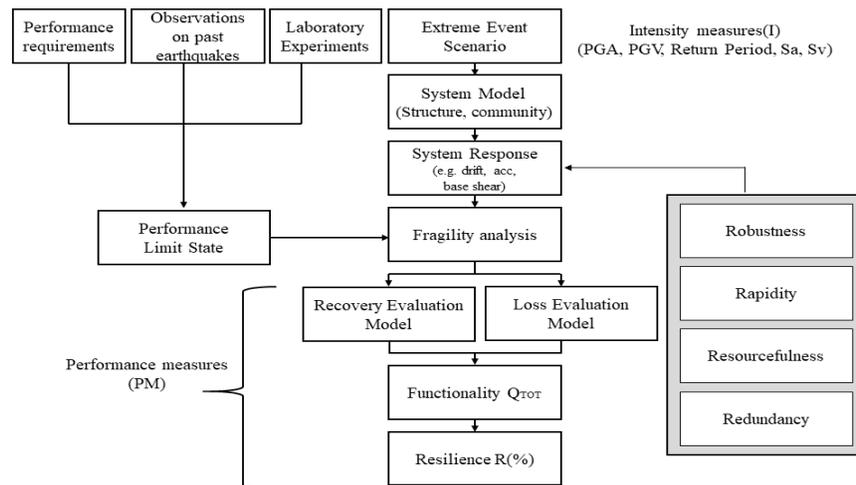
$$R = \int_{t_{OE}}^{t_{OE}+T_{LC}} Q(t) / T_{LC} dt \quad (1)$$

$$Q(t) = [1 - L(I, T_{RE})] [H(t - t_{OE}) - H(t - (t_{OE} + T_{RE}))] \times f_{Rec}(t, t_{OE}, T_{RE}) \quad (2)$$

여기서, $L(I, T_{RE})$ 는 손실함수(Loss function), $f_{Rec}(t, t_{OE}, T_{RE})$ 는 복구 기간에 대한 복구함수(Recovery function), $H()$ 는 단계별 계단함수, T_{RE} 는

재해로부터의 복구 기간, t_{OE} 는 재해 발생 시점이다.

회복탄력성은 내구성(Robustness), 신속성(Rapidity), 자원부존성(Resourcefulness), 가외성(Redundancy)의 4가지 구성요소를 건축물에 적용³⁾하여 평가할 수 있다. 신속성은 지진재해 발생 후 구조물이 과거의 신속 상태 및 기능을 회복할 수 있는 능력으로 복구 기간($t_{OE} \leq t \leq t_{OE} + T_{RE}$)동안의 회복탄력성 함수의 변화율($\frac{dQ(t)}{dt}$)로 나타낼 수 있다. 내구성은 지진재해 발생 시 구조물의 시스템, 부재 등이 견딜 수 있는 능력으로 지진 발생 시점에서 복원력의 잔류량($1 - L(m_L, \sigma_L)$ %)으로 수치화 할 수 있다. 자원부존성과 가외성은 지진재해로 인한 피해로 건축물의 기능이 상실됨에 따라 건물의 기능을 대체할 수 있는 요소 혹은 동원할 수 있는 자원이다. 이들은 서로 연관되어 있으며, 복구 기간($t_{OE} \leq t \leq t_{OE} + T_{RE}$)동안의 그래프 형상이나 기울기에 영향을 미친다.



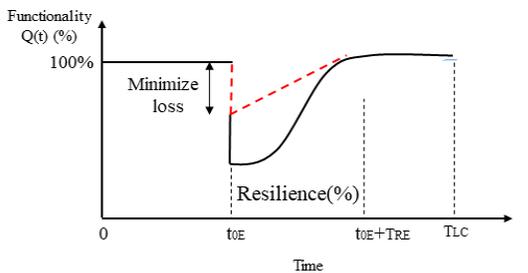
〈Fig. 2〉 Process of resilience based evaluation⁴⁾

회복탄력성 기반의 성능평가 절차는 <Fig. 2>와 같다. 우선 구조물이 위치할 지역의 지진재해도에 따른 지진 강도를 예측하여 설계 지진파를 선정한 뒤 대상 구조물에 대해 해석모형을 구축하여 비선형 동적해석 (Nonlinear dynamic analysis)을 수행한다. 이를 통해 구조물의 층간변형률, 밀면전단력, 가속도 등 동적응답을 추출한 후 손상도 기준에 따라 지진취약도를 산정하여 손상발생확률을 예측하고, 이를 손실평가함수와 복구 기간 평가함수에 적용하여 회복탄력성 수치를 정량적으로 산출한다.

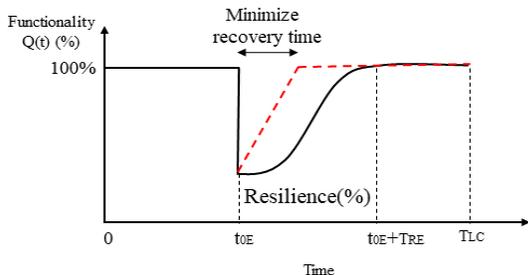
이러한 회복탄력성 기반의 성능평가는 구조물의 인명 안전(Life safety), 손상(Damage), 복구(Recovery)까지 3가지 요소를 설계에 반영할 수 있도록 하며, 보수 비용과 보수 기간을 산출하여 가능한 한 빠른 기간에 구조물의 기능이 회복될 수 있도록 설계할 수 있다. 회복탄력 성능을 높일 수 있는 방안은 구조물의 지진재해 시 손실을 최소화 할 수 있고 보수 기간이 길지 않은 내진보강 공법을 선정하여야 하며, 면진 및 제진공법을 구조물에 적용함으로써 성능을 증대시킬 수 있다⁵⁾.

3. 손실·복구 기간 예측모델

구조물의 지진재해 후 복원력을 평가하기 위해서는



(a) Minimize loss



(b) Minimize recovery time

<Fig. 3> Improvement plan of resilience

확률론에 근거한 지진취약도 해석을 통해 손실예측모델 (Loss evaluation)과 복구 기간 평가모델(Recovery evaluation model)로 예측하여 평가할 수 있다. 손실예측모델은 지진재해로 인한 구조물의 직·간접적인 손실을 모두 고려하여 산정되며, 모든 손실을 합산한 비용에 손상발생확률을 곱하여 확률론적인 손실 비용을 예측할 수 있다²⁾. 직접적인 손실(L_D , Direct losses)이란 지진재해에 대한 직접적인 구조체 및 비구조체 손실(L_{DE})과 인명피해(L_{DC})이며, 간접적인 손실(L_I , Indirect losses)은 지진재해로 인한 업무방해, 임대료 손실, 병원과 같은 의료시설의 기능 중단으로 인한 사상자 발생 등이다. 손실 예측의 총합은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{I,D} = L_{DE,IE} + L_{DC,IC} \tag{3}$$

$$L_{DE}(I) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_{s,j}}{I_s} \cdot \prod_{i=1}^T \frac{(1+\delta_i)}{(1+r_i)} \right] \cdot P_j \{ \bigcup_{i=1}^n (R_i \geq r_{lim,i}/I) \} \tag{4}$$

$$L_{DC}(I) = \frac{N_{in}}{N_{tot}} \tag{5}$$

여기서 P_j 는 지진강도 I 일 때 j 손상 상태(Damage state) 이상으로 될 확률, $C_{s,j}$ 는 j 손상 상태에서의 건물 보수 비용(Repair cost), I_s 는 건물 신축 비용, r_i 는 연할인율, t_i 는 재해 발생 후 보수 기간, δ_i 는 연간 가치하락률, N_{tot} 는 재해로 인한 사상자 수, N_{in} 은 재해로 인한 사망자 수이다.

간접적인 손실은 건축물의 이전 비용, 임대 수익 손실 등 건축물이 제 기능을 하지 못할 때 발생할 수 있는 손실로 직접적인 손실에 비해 정량적 측정이 어렵다. 하지만 이러한 손실은 직접적인 손실만큼 중요하다. 지진재해로 인해 교량이 붕괴되었다고 가정한다면 구조체의 손상에 대한 보수 비용뿐만 아니라 보수 기간 동안 교량 기능을 사용할 수 없어 관련 수익 창출이 불가하며, 교량을 이용하는 유동인구도 간접적인 손실로 볼 수 있다. 병원 등 의료시설에서 건축물의 기능 상실로 인한 사상자가 발생한다면 직접적인 피해를 입은 사상자만큼 간접적인 피해로 인한 인명손실도 크게 나타날 수 있다. 따라서 간접적인 손실도 복원력 기반의 성능평가에서 측정되어야 한다.

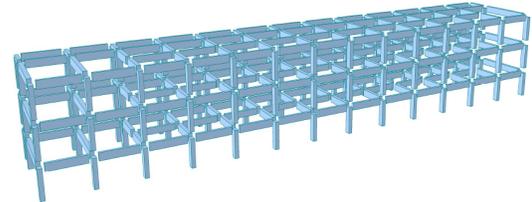
복구 기간 평가모델은 구조물의 회복탄력성을 정량적으로 측정하는 중요한 요소이며, 구조물이 지진재해 이전의 신축 상태로 복구할 수 있는 기간을 의미한다. 현

재 복구 기간(Repair time)의 예측은 대부분 FEMA P-58⁶⁾의 방법론에 근거하고 있으며, ATC(Applied Technology Council)에서 배포한 PACT(Performance Assessment Calculation Tool) 프로그램을 통해 정량적인 수치로 예측할 수 있다. 하지만 FEMA P-58에 근거한 복구 기간 산정 방법론은 구조체와 비구조체의 직접적인 손실 및 보수 기간에만 국한되어 있으며, 지진재해 동안의 다운타임(Downtime) 반영이 미흡하다. 이러한 현황에서 국외의 A사는 지진재해에 대한 다운타임을 반영한 복구 기간 예측기법¹⁾을 개발하였으며, 플로우차트화 하여 매뉴얼로 발간하였다. 구조체와 비구조체에서 손상된 부분을 보수하는 기간뿐만 아니라 지진재해 후 사전조사, 보강설계 기간, 발전시설 및 수공급시설 복구 기간 등의 지연 요소(Impeded factor)를 고려한 다운타임도 구조물의 회복탄력성에 기반한 복구 기간 예측에 큰 영향을 미친다.

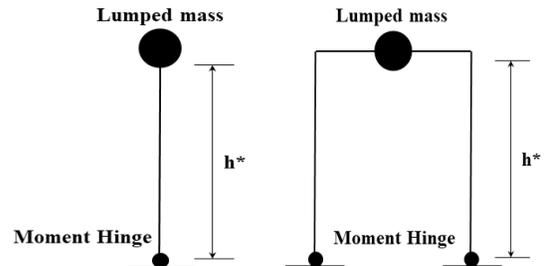
4. 손실 비용 예측을 위한 등가단자유도 시스템

4.1 등가단자유도 해석모델

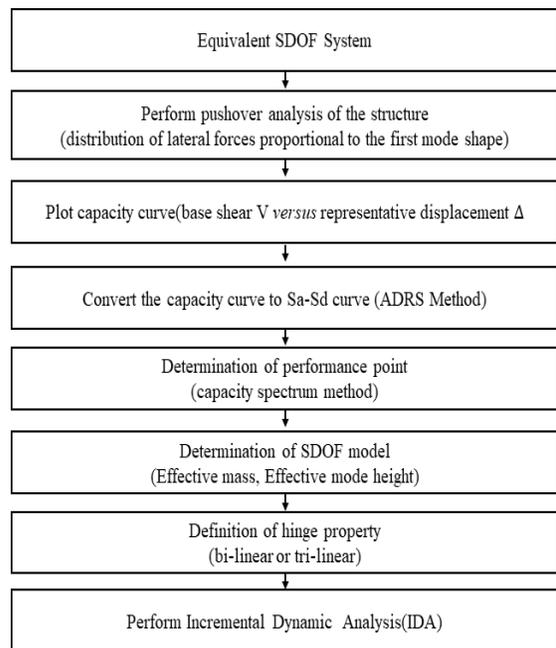
손실 및 복구 기간의 예측모델 구축을 위해서는 손상 발생 확률을 산정하여야 하며, 이는 지진취약도를 통해 도출할 수 있다. 지진취약도 해석 시 비선형 정적해석(Nonlinear static method)에 의한 역량스펙트럼 방법(Capacity spectrum method)을 사용하면 구조물의 성능과 지진하중에 대한 요구수준을 효과적으로 분석할 수 있지만, 고차모드의 영향이 크거나 비정형성을 가진 구조물에 대해서는 해석의 정확성이 상대적으로 떨어진다⁷⁾. 반면 비선형 동적해석은 실제 지진파를 구조물에 가력하여 구조물의 동적응답을 파악하기 때문에 비선형 정적해석에 비해 정확하고 신뢰도가 높은 해석 방법이다. 이에 따라 지진가속도의 크기를 다양하게 증가시켜 구조물이 붕괴 수준에 이르기까지 해석하는 방법인 증분동적해석(IDA, Incremental Dynamic Analysis)을 통해 지진취약도를 평가하고 있지만, 실무에 적용하기에는 구조물의 해석 시간이 오래 걸리고 반복적인 해석으로 핵심적인 동적응답을 파악하는데 비효율적이다. 오히려 실제 구조물을 등가의 단자유도 시스템으로 치환하여



(a) Example structure



(b) Cantilever SDOF (c) Rahmen SDOF
 <Fig. 4> Equivalent SDOF analytical model



<Fig. 5> Equivalent SDOF analytical model

해석하는 것이 효율적이므로 본 연구에서는 캔틸레버와 라멘 형태의 등가의 단자유도 시스템을 제안하였다. 아울러 <Fig. 4>와 같은 학교시설과 유사한 보-기둥 골조 시스템의 철근콘크리트 구조물을 예제구조물로 선정하여 적용하였다. 제안된 캔틸레버형 등가단자유도 시스템은 <Fig. 5>와 같은 절차를 통하여 구축할 수 있다.

식 (6)과 같은 예제구조물의 주요모드에 대한 횡력 분포(s_1)로 푸쉬오버 해석(Push over analysis)하여 밀면

전단력과 지붕층 변위의 관계를 나타내는 성능곡선 (Capacity curve)을 도출할 수 있다.

$$s_1 = m\phi_1 \tag{6}$$

성능곡선은 지진하중에 대한 요구내력을 나타내기 위해 요구스펙트럼(Demand spectrum)과 비교하여 성능점을 산정하여야 한다. 이를 위해서는 식 (7)~(9)와 같이 ADRS(Acceleration-Displacement Response Spectrum)법을 이용할 수 있다. ADRS법은 주요모드에 대한 질량참여계수(β_1)와 모드벡터(ϕ_1)를 이용하여 밀면전단력(V_{b1})과 지붕층변위(Δ_1)를 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위 형태의 역량스펙트럼(Capacity spectrum)으로 변환하여 하나의 좌표계로 표현할 수 있다. 본 예제구조물의 요구스펙트럼은 KDS 41 17 00⁸⁾에 따라 1.5배 DBE 스펙트럼의 요구수준에 해당되는 점을 성능점으로 산정하였으며, 이때의 좌표를 구조물의 극한강도점으로 산정하였다.

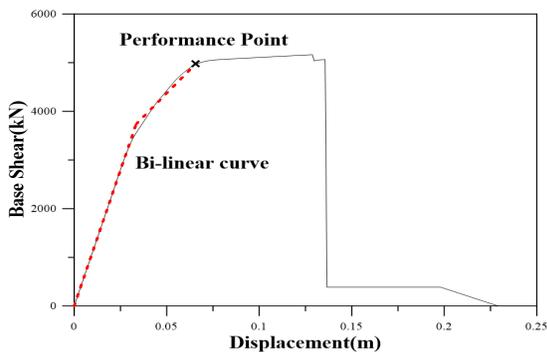
$$\beta = \frac{\{\phi_1\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}} \tag{7}$$

$$V_{b1} = M_1 S_{a1} \tag{8}$$

$$\Delta_1 = \beta_1 \phi_{i1} S_{d1} = S_{d1} \tag{9}$$

여기서, β_1 는 질량참여계수, M_1 은 구조물의 주요모드에 대한 유효질량, S_{a1} 은 주요모드에 대한 스펙트럼 가속도, S_{d1} 은 주요모드에 대한 스펙트럼 변위이다.

예제구조물에 대한 성능곡선은 <Fig. 6>과 같으며 성능곡선의 이선형화를 통해 등가의 단자유도 구조물의



<Fig. 6> Capacity curve of example structure

항복강도, 항복 후 강성, 극한강도의 비선형 이력특성을 산정하였다. 등가의 단자유도 해석모델은 캔틸레버 형태로 기둥 끝단에 집중질량을 주었으며, 주요모드에 대한 질량참여율에 따라 1,513ton으로 산정하였다. 또한 캔틸레버와 라멘골조의 횡강성은 성능곡선의 초기 탄성강성과 동일하게 하였으며, 이에 따라 구조물의 주요모드에 대한 고유주기(0.7399sec)가 일치하도록 모델링 하였다. 등가단자유도 해석모델의 높이는 예제구조물의 모드특성을 반영할 수 있도록 식 (10)과 같이 모드특성에 대한 유효높이를 산정하여 구조물의 높이에 따른 고유모드특성을 반영하였다.

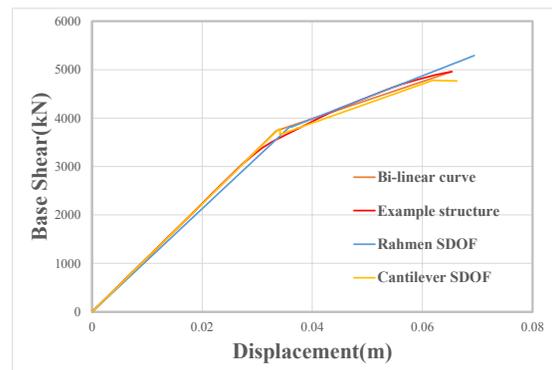
$$h^* = \frac{L_n}{L_\theta} \tag{10}$$

$$L_n = \sum_{i=1}^n m_i \phi_i \tag{11}$$

$$L_\theta = \sum_{i=1}^n h_i m_i \phi_i \tag{12}$$

여기서, h^* 는 모드특성에 대한 유효높이, m_i 는 절점 질량, ϕ_i 는 절점의 고유벡터, h_i 는 해당 절점 높이이다.

단자유도 해석모델의 비선형 특성은 소성힌지요소인 모멘트-힌지요소(Moment-Hinge)를 기둥 지점에 적용하였으며, 성능곡선의 항복점과 극한강도점에서의 휨각도, 회전각을 구하여 힌지특성에 반영하였다. 해당 등가의 단자유도 시스템은 <Fig. 7>과 같이 상용해석 프로그램인 Perform 3D, Midas Gen을 통해 성능곡선을 비교하여 연구모델을 검증하였다.



<Fig. 7> Comparison of capacity curve

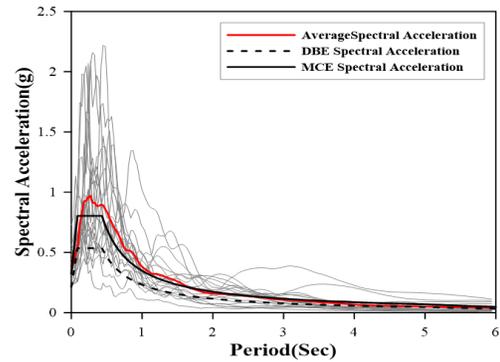
4.2 증분동적해석

일반적인 증분동적해석의 프로세스는 지진파를 선정하여 구조물의 1차 고유주기에 따른 스펙트럼 가속도를 기준으로 점진적으로 증가시켜 시간이력해석을 수행한 후 최대밀면전단력, 최대지붕층변위비, 층간변형률 등 동적응답을 추출한다. 이를 가속도 스펙트럼-동적응답 그래프 상에 표시하여 IDA 곡선을 도출할 수 있다. 이러한 반복적인 해석 절차로 인해 실제 구조물을 단순화시켜 해석을 수행하는 것이 효율적이며, 앞서 제안된 캔틸레버형 및 라멘형 단자유도 해석모델에 대하여 증분동적해석을 수행 후 비교 분석하였다.

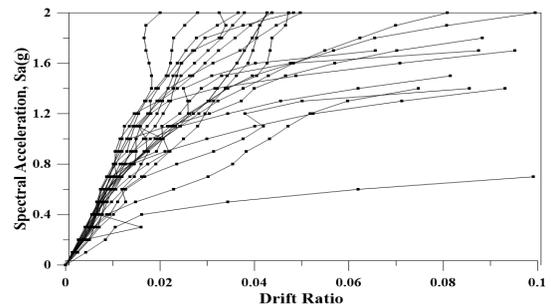
본 해석에서 비선형 동적해석에 사용된 22개의 지진파는 <Table 1>과 같다. 각 지진 데이터는 규모, 지반 조건, 진원지 등이 상이하므로 <Fig. 8>과 같이 KDS 41 17 00⁸⁾의 설계스펙트럼에 근사하게 지진파를 스케일링 하였으며, 해석모델의 고유주기에 해당하는 스펙트럼 가속도를 0.1~2.0g까지 증분하여 상용 구조해석프로그램인 Perform 3D를 통해 비선형 동적해석을 수행하였다. 동적응답으로는 층간변형률 데이터를 사용하였으며, 해석을 통해 도출된 IDA 곡선은 <Fig. 9>과 같다.

<Table 1> Earthquake data

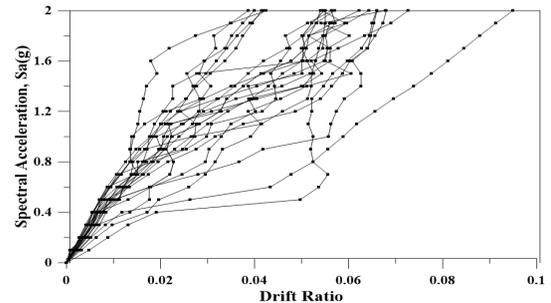
Case	Earthquake	Max. Acc (gal)
EQ1	Northridge A	0.42
EQ2	Northridge B	0.41
EQ3	Duzce, Turkey	0.73
EQ4	Hector	0.27
EQ5	Imperial Valley A	0.24
EQ6	Imperial Valley B	0.36
EQ7	Kobe, Japan A	0.51
EQ8	Kobe, Japan B	0.24
EQ9	Kocaeli, Turkey A	0.31
EQ10	Kocaeli, Turkey B	0.22
EQ11	Landers A	0.24
EQ12	Landers B	0.28
EQ13	Loma Prieta A	0.53
EQ14	Loma Prieta B	0.56
EQ15	Manjil, Iran	0.51
EQ16	Superstition Hills A	0.36
EQ17	Superstition Hills B	0.45
EQ18	Cape Mendocino	0.39
EQ19	Chi-Chi, Taiwan A	0.35
EQ20	Chi-Chi, Taiwan B	0.47
EQ21	San Fernando	0.21
EQ22	Friuli, Italy	0.35



<Fig. 8> Scaling of ground motions



(a) IDA curve (Cantilever model)



(b) IDA curve (Rahmen model)

<Fig. 9> IDA curve

등가단자유도 시스템의 증분동적해석 결과, 캔틸레버형 등가단자유도 시스템은 층간변위비가 약 0.02까지 비교적 선형적인 양상이 나타났으며, 층간변위비가 약 0.03부터 비선형변형이 발생하면서 단자유도 시스템에 잔류변위가 나타나기 시작하였다. 층간변위비 0.1에 도달할 때 더 이상 층간변위비가 증가하지 않았으며, 구조물의 잔류변형이 크게 발생하면서 해석이 종료되었다. 라멘 형태의 등가단자유도 시스템도 마찬가지로 층간변위비가 약 0.02까지 선형적인 양상이 나타났고, 이후 잔류변형이 나타났다. 캔틸레버 형태의 단자유도 시스템과 달리 층간변위비가 약 0.05부터 파단이 나타나면서 해석이 더 이상 진행되지 않았다.

4.3 지진취약도 해석

지진 발생 시 강도에 따라 구조물에 특정 손상이 발생하거나 초과할 확률에 대하여 지진취약도 함수를 통해 확률론적으로 내진성능을 평가할 수 있다. 이를 위해서는 먼저 등가단자유도 시스템의 손상도 기준을 선정하여야 한다. HAZUS에서는 손상도 기준을 Slight(미세 손상), Moderate(중간 손상), Extensive(심각한 손상), Complete(완전 붕괴)의 4단계로 정의하고 있다. 콘크리트 골조를 중심으로 각 4단계의 손상도 특징을 살펴보면 Slight는 일부 부재에 미세균열이 발생한 상태, Moderate는 일부 부재의 항복상태, Extensive는 대부분의 부재가 항복하고 일부 부재가 극한에 도달한 상태, Complete는 구조물이 붕괴하거나 붕괴 직전인 상태를 의미한다. Barbet, Pujades & Lantada(2008)⁹⁾의 연구에서는 <Table 2>와 같이 역량스펙트럼을 토대로 각 손상 상태에 따른 층간변위비 기준을 제시하고 있다. Slight의 경우 이선형화된 성능곡선에서 항복점(D_y)의 70% 수준에 대응하는 층간변위비, Moderate 수준의 손상도는 항복점(D_y)에 해당하는 층간변위비로 정의하였다. 또한 Extensive 수준의 손상도는 연성도($D_u - D_y$)의 25%에 해당하는 층간변위비, Complete는 최대강도점(D_u)으로 정의하였다.

연급된 손상도 기준에 따라 증분동적해석 결과, 구조물의 응답이 손상 기준을 초과할 확률은 식 (13)과 같이 조건부 함수로 나타낼 수 있다.

$$P[C < D | SI = x] = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(\hat{C}/\hat{D})}{\sqrt{\beta_{D,SI}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}}\right] \quad (13)$$

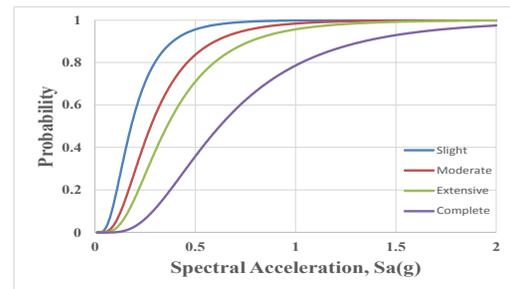
여기서, Φ 는 표준 정규 분포의 면적(Standard normal probability integral), \hat{C} 는 11개의 지반 가속도에 대해서 예제 구조물에 각 손상 상태를 유발하는 스펙트럼 가속도, \hat{D} 는 구조물의 소요 스펙트럼 가속도,

<Table 2> Damage state thresholds

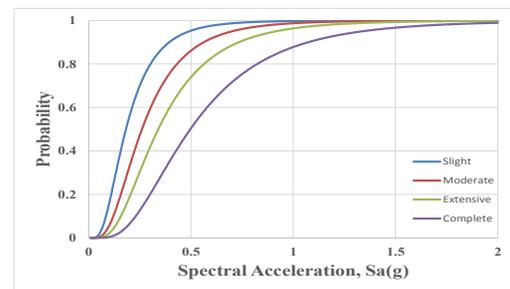
Damage state	Thresholds
Slight	$0.7D_y$
Moderate	D_y
Extensive	$D_y + 0.25(D_u - D_y)$
Complete	D_u

<Table 3> Damage state with 50% probability

Damage state	Cantilever \hat{C}	Rahmen \hat{C}
Slight	0.18018564	0.18231037
Moderate	0.277634274	0.26063549
Extensive	0.358974883	0.340203585
Complete	0.621511918	0.497132924



(a) Cantilever SDOF



(b) Rahmen SDOF

<Fig. 10> Seismic fragility curve

$\sqrt{\beta_{D,SI}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}$ 은 전체 시스템 불확실성이다. 구조 시스템의 불확실성은 FEMA P695¹⁰⁾에서 제시하고 있으며, 본 해석에서는 모델링 과정 등에서 발생할 수 있는 불확실성을 고려하여 0.6으로 가정하였다.

증분동적해석 결과, 본 해석모델의 경우 각 손상 상태에 대한 손상 발생 확률이 50%일 때의 \hat{C} 값은 <Table 3>과 같으며, 식 (13)을 이용하여 <Fig. 10>과 같이 손상 상태별 지진취약도 곡선을 나타내었다. 2가지 등가의 단자유도 시스템 모두 0.78g의 스펙트럼 가속도에서 Slight, Moderate, Extensive 수준의 손상이 발생할 확률이 90% 이상 나타났지만, Complete 수준의 손상이 발생할 확률은 캔틸레버 형태의 등가단자유도 시스템의 경우 1.35g, 라멘 형태의 등가단자유도 시스템은 1.08g으로 지진취약도곡선의 기울기 차이가 나타났다. 이는 캔틸레버 형태의 등가단자유도 시스템과 달리 라멘 형태 등가단자유도 시스템의 P-Δ 효과가 상이하기 때

문에 구조물이 붕괴 시점에 이르는 층간변위가 다른 것으로 판단된다.

5. 결론

회복탄력성 기반의 성능평가를 통해 건물이 지진재해 후 건물의 복구 능력을 평가할 수 있으며, 차세대 성능 기반 설계법에 반영할 필요성이 대두됨에 따라 본 연구에서는 회복탄력성 기반 성능평가의 고찰과 적용 방안에 대해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 회복탄력성 기반의 성능평가를 위해서는 손실예측 모델과 복구 기간 평가모델을 통해 정량화된 수치로 나타낼 수 있다. 2가지 예측모델을 구축하기 위해서는 직접적인 피해 외에 간접적인 피해도 고려하여야 한다.

2) 구조물의 지진재해에 대한 복구 기간 평가는 구조체 및 비구조체의 보수 기간뿐만 아니라 지진재해 후 사전조사, 보강설계 기간, 발전시설 및 수공급시설 복구 기간 등 다운타임을 고려하여야 하며, 국내에 적합한 복구 기간 평가 프로세스를 정립하여 프로우차트화 하는 것이 필요하다.

3) 손실예측모델 구축을 위해서는 확률론에 근거한 지진취약도 해석이 필요하지만 반복적이고 해석 시간이 다소 오래 걸린다. 실무의 적용을 위해서는 단순화된 평가모델을 사용하여 효율적이고 해석 시간을 단축시킬 필요가 있다.

4) 이에 따라 본 연구에서는 캔틸레버 및 라멘 형태의 등가단자유도 시스템을 제안하였다. 증분동적해석 결과, 붕괴 상태의 층간변위비까지 선형거동이 나타난 것으로 보아 힌지의 이력특성에 대해 강성저감계수를 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 지진취약도 해석 결과, 2가지 등가단자유도 시스템은 유사한 지진취약도곡선이 나타났지만 Complete 수준의 손상 상태에서는 기울기가 다소 상이하여 $P-\Delta$ 효과 등 구조물의 중력하중에 대한 거동을 모사할 수 있도록 보완해야 할 것으로 판단된다.

추후 회복탄력성 기반 성능평가법의 국내 도입을 위한 구체적인 연구를 수행할 예정이며, 손실 예측을 위한 등가의 단자유도시스템 보완 및 단순화된 다자유도시스템을 제안할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 신진연구자 지원사업과제(NRF-2020R1C1C1005779)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Almufti, I., & Willford, M., "REDi™ Rating System: Resilience-based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings", Resilience-based Earthquake Design Initiative (REDi™) Rating System, 2013, pp.1~133 doi: 10.13140/RG.2.2.20267.75043
2. Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M., "Framework for analytical quantification of disaster resilience", Engineering Structures, Vol.32, No.11, pp.3639~3649, 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.08.008
3. American Society of Civil Engineers & Risk and Resilience Measurement Committee, "Resilience-Based Performance: Next Generation Guidelines for Buildings and Lifeline Standards", American Society of Civil Engineers, pp.1~85, 2019.
4. Cimellaro, G. P., Renschler, C., & Bruneau, M., "Introduction to Resilience-Based Design (RBD)", Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Vol.33, pp.151~183, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-06394-2_10
5. Hadigheh, S. A., Mahini, S. S., Setunge, S., & Mahin, S. A., "A preliminary case study of resilience and performance of rehabilitated buildings subjected to earthquakes", Earthquakes and Structures, Vol.11, No.6, pp.967~982, 2016, doi: 10.12989/eas.2016.11.6.967

6. Federal Emergency Management Agency, "FEMA P-58; Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1", FEMA, pp.1-1~8-7, 2018.
 7. Han, S. W., Moon, K. H., & Kim, J. S., "Equivalent SDF Systems Representing Steel Moment Resisting Frames", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.12, No.3, pp.21~28, 2008, doi: 10.5000/EESK.2008.12.3.021
 8. Architectural Institute of Korea, "Seismic Building Design Code and Commentary : KDS 41 17 00", pp.26~27, 2019.
 9. Barbet, A. H., Pujades, L. G., & Lantada, N., "Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.28, No.10-11, pp.851~865, 2008, doi: 10.1016/j.soildyn.2007.10.006
 10. Federal Emergency Management Agency, "FEMA P695; Quantification of Building Seismic Performance Factors", FEMA, pp.1-1~11-12, 2009.
- Received : November 18, 2020
 - Revised : November 30, 2020
 - Accepted : November 30, 2020