

중저층 철근콘크리트 주거형 건축물의 내진성능평가를 위한 단자유도 모델 구축

박민석¹·이서연¹·최인섭^{2†}

¹계명대학교 건축공학과 학부연구생, ²계명대학교 건축공학과 조교수

Development of an SDOF Model for Seismic Performance Evaluation of Low to Mid-Rise Reinforced Concrete Residential Buildings

Minseok Park¹, Seoyoun Lee¹ and Insub Choi^{2†}

¹Undergraduate Researcher, Department of Architectural Engineering, Keimyung Univ, Daegu, 42601, Korea

²Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Keimyung Univ, Daegu, 42601, Korea

Abstract

During earthquakes, buildings can suffer damage ranging from minor to severe, potentially leading to collapses and resulting in loss of life and property. To mitigate these risks, it is essential to evaluate the seismic performance of buildings. Current seismic performance evaluation techniques require significant time as they focus on individual buildings. Therefore, there is a need to develop evaluation techniques that can be applied on a regional scale. This study proposes a single-degree-of-freedom model with a nonlinear shear spring to assess the seismic performance and plan the reinforcement of reinforced concrete residential buildings. The nonlinear shear spring, defined by the T-SR- μ parameter, is used to simulate the nonlinear response of the structure. By applying 100-PEER ground motions to this model, the seismic performance of the buildings was evaluated based on the maximum inter-story drift ratio response. The applicability of the proposed technique was confirmed by comparing it with detailed models, where both models assessed the seismic performance of the buildings at similar levels. This results demonstrate that the proposed method can accurately predict the seismic performance of actual buildings.

Keywords : equivalent SDOF system, RC residential buildings, seismic performance evaluation, preliminary retrofit scheme

1. 서론

지진 발생 시, 건축물은 경미한 수준의 손상에서 크게는 붕괴까지 이어지게 되어 인명과 재산상의 막대한 피해를 주게 된다. 6층 이하의 중저층 철근콘크리트 주거형 건축물의 경우, 1층은 주차공간이나 상업공간을 위해 개방된 구조, 2층 이상은 주거공간을 위해 벽과 같은 닫힌 구조를 갖는다. 이러한 공간사용으로 인해, 1층과 상부층간의 강성비정형은 soft-story (연층)현상을 야기한다. 연층을 갖는 건축물의 경우 지진에 상당히 취약하다(Dya and Oretaa, 2015). 연층이란 해당 층의 강성이 인접 층 강성의 70% 미만인 경우를 의미하며, 인접 층 강성의 60% 미만인 extreme soft-story도 존재한다.

일반적으로 beam-sway의 경우 건축물의 층에 걸쳐 plastic hinge가 형성되는 반면, 연층을 갖는 건축물은 지진 발생 시 해당 층에 변위가 집중되기 때문이다(Fig. 1). 연층을 갖는 건물에 있어 전 세계적으로 지진에 의한 다수의 피해사례가 보고된다. 국내에서는 2017년 포항 지진에 의해 연층을 가진 많은 필로티 건축물의 피해가 관측되었으며(AIK, 2018; Moon et al., 2018), 해외에서는 2011년 터키 Van 지진(Sextos et al., 2011), 2017년 멕시코 Puebla 지진, 2018년 대만 Hualian 지진 등으로 인해 주거형 철근콘크리트 건축물의 지진 피해사례를 확인할 수 있다. 따라서 건축물의 지진피해를 사전에 대비하기 위해 적절한 성능평가를 통한 내진 보강이 필요한 실정이다.

건물의 내진 보강 여부를 판단하기 위해서는 먼저 건물의

[†]Corresponding author:

Tel: +82-53-580-5590; E-mail: insub@kmu.ac.kr

Received June 20 2024; Revised August 3 2024;

Accepted August 21 2024

© 2024 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

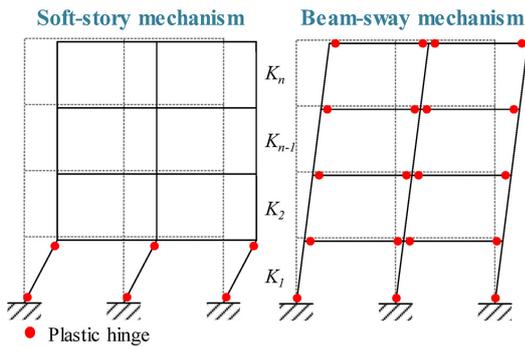


Fig. 1 Comparison of soft-story mechanism and beam-sway mechanism

내진성능을 평가해야 한다. 지진에 의한 피해는 특정 건물에 피해가 집중되는 것이 아니라 지역 규모로 발생하게 되므로 지역적인 수준에서의 내진성능을 평가하는 기법이 필요하다. 또한 국내의 필로티 건축물은 강성비정형이 크므로(Lee and Ko, 2002; 2007; Shin et al., 2014; Sohn et al., 2020), 이를 고려할 수 있는 모델이 필요하다. 하지만, 기존의 내진성능평가 기법의 경우 지역 규모로 건물의 내진성능을 평가하는 것이 아닌 개별 건물을 대상으로 내진성능을 평가한다. 이는 지역에 존재하는 건물들의 내진성능을 평가하기 위해서 많은 시간을 소요하게 된다(Calvi et al., 2007). 즉, 다수의 건물을 대상으로 하는 내진성능평가 기법이 필요하다.

기존의 지역 규모 내진성능평가 기법 중 Integrated Earthquake Simulation(IES) tool(Hori and Ichimura, 2008)은 지역 내 다양한 건물의 구조 및 재료 특성을 반영하기 위해 많은 시간이 소요되며, 정교한 해석에 있어 고성능 컴퓨터 등의 인프라가 갖추어져야 한다. Multi-story concentrated-mass shear(MCS) model(Bo et al., 2014)의 경우 선형 거동을 가정하기에 지진에 대한 응답 예측이 부정확할 수 있다. 이외에도 지진에 의한 물리적 손상을 기반으로 지역 레벨에서 지진손실을 평가하는 연구들(Latcharote et al., 2018; Zeng et al., 2016)이 수행되고 있다. 하지만, 내진보강 전후 건축물의 물리적 손상의 변화를 판단할 수 없어, 내진보강에 대한 의사결정 데이터를 제공하기 어렵다. 따라서, 기존 지역 규모 내진성능평가 기법의 단점을 보완하여, 빠른 시간에 내진보강 전략을 도출할 수 있는 적절한 기법이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 철근콘크리트 주거형 건축물의 빠른 내진성능평가와 내진보강전략을 도출할 수 있는 단자유도 모델을 구축하고자 한다. 건물의 비선형 거동을 반영할 수 있는 $T-SR-\mu$ 를 매개변수로 이상화된 단자유도모델을 구축하였다. 구축된 모델을 비선형 시간이력해석을 통해 도출된 최대층간변위비를 통하여 내진성능을 평가한다. 제안된 기법의 타당성을 판단하기 위하여 필로티형 RC 주거형 건물의 상세 모델과의

내진성능을 비교하였다. 추가적으로 $T-SR-\mu$ 매개변수로부터 도출된 지진응답을 기반으로 현재 내진성능을 만족할 수 있는 내진보강전략을 빠르게 도출할 수 있다.

2. 단자유도모델의 지진응답을 통한 내진성능평가

2.1 단자유도모델 구축

본 연구에서 고려한 중저층 RC주거형 건축물의 층수는 6층 이하이기 때문에 해당 건축물의 동적 응답은 질량 참여율 90% 이상을 나타내는 1차 모드에 의해 크게 의존되기에 단자유도 모델을 적용하기에 적절하다(Chopra and Chintanapakdee, 2004). 다양한 지진파에 대한 건물의 비선형 응답을 도출하기 위해서 Fig. 2와 같이 단자유도모델인 건물과 동일한 주기(T)를 갖는 단자유도모델로 간략화 한다. 다음으로 단자유도모델의 지점에 비선형 shear spring을 추가함으로써 구조물의 비선형 응답을 모사한다.

비선형 shear spring의 backbone curve는 Fig. 3과 같으며, 10

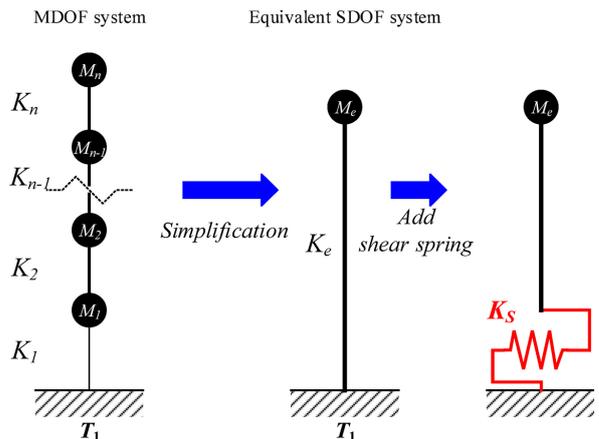


Fig. 2 Description of modeling process for equivalent SDOF model with nonlinear shear spring

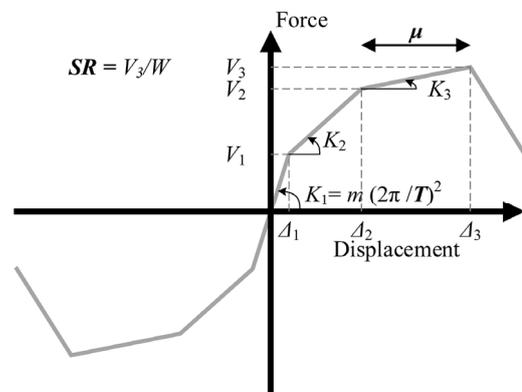


Fig. 3 Backbone curve of nonlinear shear spring as modeled with the $T-SR-\mu$ parameters

개의 parameters로 모델링 된다; 1) the initial stiffness(K_1), 2) the second-branch stiffness(K_2), 3) the third-branch stiffness (K_3), 4) the forth-branch stiffness(K_4), 5) the first-branch displacement(Δ_1), 6) the second-branch displacement(Δ_2), 7) the third-branch displacement(Δ_3), 8) the first-branch force(V_1), 9) the second-branch force(V_2), 10) the third-branch force(V_3). 모델의 매개변수 T 와 SR 을 정의하게 되면 식 (1) 과 (2)를 통해 K_1 과 V_2 값을 간단하게 계산할 수 있다.

$$K_1 = m \times \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad (1)$$

$$V_2(\text{or } V_3) = SR \times W \quad (2)$$

현재 코드에서 over-strength factor는 2.5로 설정되어 있어 V_1 은 V_2 의 40%로 가정된다. K_1 과 V_1 을 통해 Δ_1 을 도출할 수 있다. K_2 값은 ASCE 41-23(ASCE, 2023)에서 정의한 30% effective stiffness factor 사용하여 K_1 을 감소시켜 계산한다. 계산된 V_2 , K_2 그리고 Δ_1 을 통해 Δ_2 가 구해지며, Δ_3 은 정의된 μ 와 Δ_2 의 곱으로 구해진다. 각 parameter에 대한 더 자세한 설명은 Shin 등(2021)을 참고한다. 하나의 T - SR - μ set은 한 건물의 비선형 모델에 대한 input parameters며, 비선형 시간 이력 해석을 통해 output parameter인 최대층간변위비(MIDR)을 도출한다.

비선형 shear spring의 input parameters는 T - SR - μ 를 매개로 정의되며, T - SR - μ 는 식 (3)~(5)과 같이 정의된다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K_1}{m}} \quad (3)$$

$$SR = \frac{V_3}{W} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\Delta_3}{\Delta_2} \quad (5)$$

여기서, m 은 $DL+0.25LL$ (DL =dead load and LL =live load)로 정의되는 건축구조물의 mass, W 는 structural weight를 나타낸다.

2.2 Datasets 구축 및 내진성능평가

2.2.1 Datasets 구축

T 는 구조물의 층수에 따른 주기를 나타내며, 0.10~0.75s의 범위에서 0.1을 간격으로 총 8개의 데이터를 가진다. SR 는 건물의 가속도 응답을 나타내며, 0.1~0.8의 범위에서 0.1 간격으로 총 8개의 데이터로 구성된다. μ 는 건물의 붕괴모드를 나타내는 변수로 0.5~4.0의 범위에서 0.5 간격, 4.0~8.0의 범위에서 1.0의 간격으로 총 12개의 데이터로 구성된다. 데이터에 대한 자세한 사항은 Table 1에 정리하였다. 입력 매개변수 T - SR - μ 의 범위는 HAZUS-MH2.1(FEMA, 2012)에서 중저층 철근콘크리트 주거형 건축물의 구조유형(concrete moment frame, concrete shear wall)을 참고하여 결정하였다. 하나의 T - SR - μ set을 가지는 각 모델은 0.18~1.87g 범위의 최대 지반 가속도를 가지는 100개의 PEER 지진파가 적용되었으며(Kircher *et al.*, 2010), 주요 지진응답으로 내진성능 예측에 사용되는 최대층간변위비 데이터를 추출했다. 입력 매개변수를 기반으로 총 76,800개의 주요 지진응답 dataset을 구축하였다.

2.2.2 지진응답을 통한 내진성능평가

건물의 내진성능평가를 위해 T - SR - μ set을 가지는 768개의 단자유도모델에 대하여 도출된 최대층간변위비를 사용하였다. 3장의 내진성능평가 대상인 필로티 건축물(RC Shear wall system)의 층간변위비기반 내진성능평가 기준은 FEMA-356(FEMA, 2000)이나 MOLIT(2021)에 정의되어 있으며, Table 2에서 확인할 수 있다. Table 2는 즉시 거주(Immediate occupancy, I.O), 인명 안전(Life safety, L.S.), 붕괴 방지(Collapse prevention, C.P.), 붕괴(Collapse) 수준 측면에서 한계를 나타낸다. 식 (6)은 단자유도 모델의 응답으로부터 층별 층간변위비를 얻기 위한 transformation function(T_m)을 나타내며, M_i 는 i 번째 모드의 유효질량, ϕ_{ij} 는 j 번째 층에서의 1차모드벡터를 나타낸다.

Table 1 Range of loading and structural parameters

Main parameter		Range	# of cases
Loading parameter	Peak ground acceleration (PGA)	0.18 to 1.87	100 earthquake records
	Period (T)	0.10 to 0.75 seconds	8
Structural parameter	Strength ratio (SR)	0.1 to 0.8	8
	Ducility parameter (μ)	0.5 (shear) to 8.0 (flexure)	12
Total number of database			76,800

$$\Gamma_m = \frac{\sum M_i \phi_{1j}^2}{\sum M_i \phi_{1j}} = \phi_{1j} \quad (6)$$

하나의 T - SR - μ set을 가지는 개별 모델당 100개의 최대층간변위비가 도출된다. 앞선 내진성능평가 기준에 따라 모델의 내진성능을 평가하기 위해선 적절한 구조물의 지진응답을 선정해야 한다. Fig. 4의 각 point는 각 모델에 대한 100개의 지진파의 최대층간변위비를 나타낸다. 본 연구에서는 최대층간변위비의 평균값을 내진성능을 평가하기 위한 대푯값으로 선정하였다.

Fig. 5는 입력 매개변수 T - SR - μ 에 따라 각 모델에서 내진성능평가에 사용되는 대표 지진응답을 나타낸다. T 값의 증가

Table 2 Limit states for RC shear wall system

Performance level	IDR limits (%)
Immediate occupancy (IO)	≤ 0.25
Life safety (LS)	≤ 0.50
Collapse prevention (CP)	≤ 1.00
Collapse	≥ 1.00

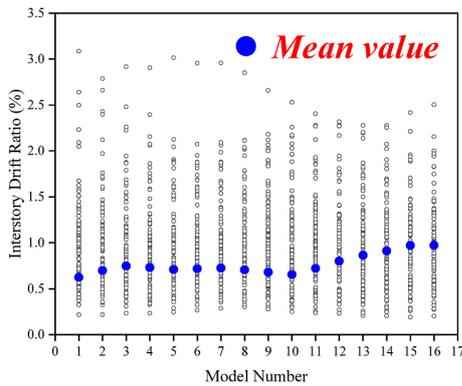


Fig. 4 Determination of maximum interstory drift ratio from nonlinear time-history analysis for 100 earthquake records at each model

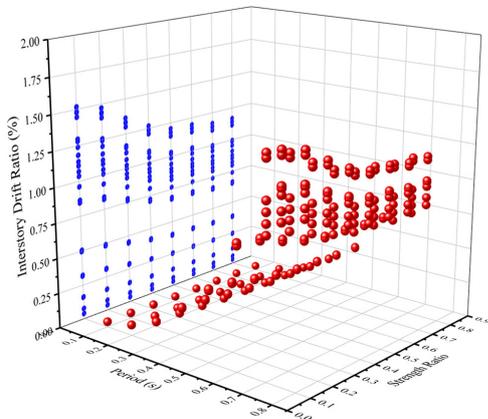


Fig. 5 3D representation of maximum interstory drift ratio according to the three input parameters (T - SR - μ)

에 따라 최대층간변위비 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 T 값의 증가가 건물의 초기 강성을 감소시키고, 감소한 강성이 횡변위 증가를 초래했기 때문으로 보인다. 그러나 SR 값에서는 다른 양상을 보여준다. SR 값이 증가함에 따라 최대층간변위비는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 높은 SR 값이 구조물의 높은 횡 방향 저항 능력을 갖추고 있음을 나타낸다.

3. 제안기법의 적용가능성 검토

3.1 상세 모델 개발 및 입력 매개변수 선정

앞서 제안된 기법을 검증하기 위하여 Fig. 6과 같이 연층을 갖는 RC 주거형 건물(필로티형 건물)의 상세 모델(FE 모델)을 제작하였다(Sohn *et al.*, 2022a; 2022b). 대상 건물은 2017년 포항 지진으로 심각한 손상을 받은 필로티형 RC 주거형 건물로 선정하였다(Kim *et al.*, 2018; 2019). 해당 건물은 1층과 상층 사이 질량 및 강성의 차이로 인해 수직 비정형성을 가진다. 수직 비정형성으로 인하여 연층인 1층에 가장 큰 손상이 발생하며, 이는 필로티형 건물에서 일반적으로 관찰되는 손상패턴이다. 상세 건물은 평면 비정형성으로 인한 비틀림 효과를 최소화하고 1층과 상층부 간의 수직 비정형성을 극대화하기 위해 수정된 구조 배치를 바탕으로 개발했다. 모델은 총 4층으로 1층은 모멘트 프레임 시스템과 2층에서 4층은 전단벽 시스템으로 구성되어 있다. 해당 건물은 비선형 유한요소 해석 프로그램인 OpenSees를 통해 제작되었다. 더 자세한 정보는 Shin 등 (2021)과 Sohn 등(2022a)에서 확인할 수 있다.

비선형 정적 해석 방법의 하나인 pushover analysis(FEMA, 2005)를 통해 매개변수 SR 과 μ 값을 추출하였다. 또한 고유치 분석을 통하여 매개변수 T 값을 도출했다. 그 결과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 해석을 통해 도출한 T - SR - μ 값은 $T=0.45$,

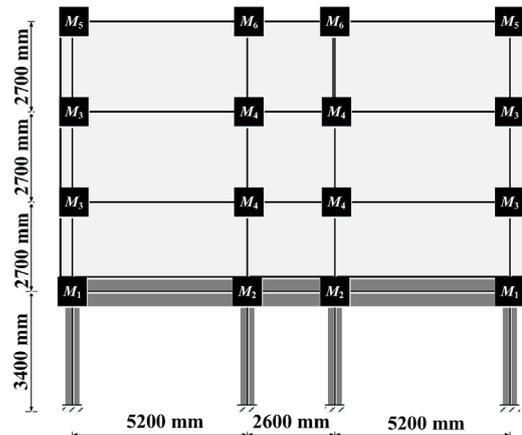


Fig. 6 Dimensions of typical RC residential building in Korea to simulate nonlinear time-history analysis

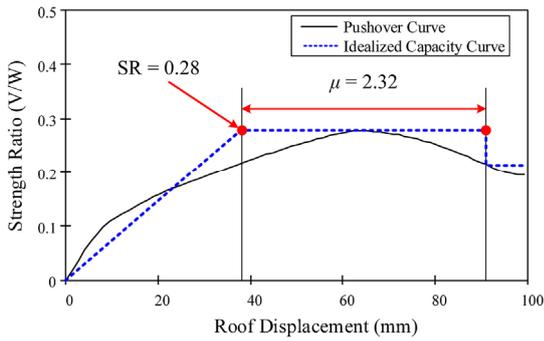


Fig. 7 Results of nonlinear static analysis for determining the T - SR - μ parameters

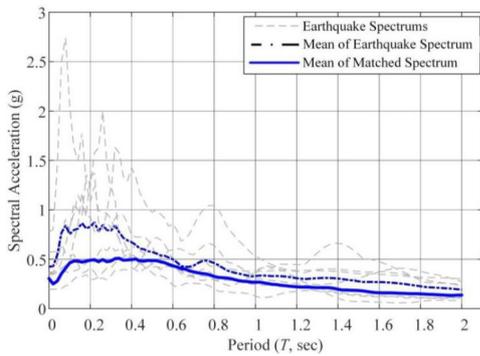


Fig. 8 Acceleration response spectra of seven earthquake records to evaluate seismic performance

$SR = 0.28$, $\mu = 2.32$ 였다. 상세해석모델의 지진응답과 본 연구에서 제시한 모델간의 지진응답을 비교하기 위해 본 연구에서 제시한 모델의 T - SR - μ 값은 $T = 0.5$, $SR = 0.3$, $\mu = 2.5$ 을 사용하였다.

3.2 모델간 내진성능비교

상세 모델의 지진 성능을 평가하기 위해 7개의 지진기록을 대상으로 비선형 시간이력해석을 수행하였다(MOLIT, 2021). Fig. 8은 비선형 시간이력해석에 사용된 7개 지진파의 응답 스펙트럼을 설계스펙트럼과 유사하게 조절한 스펙트럼을 나타낸다. 목표 응답 KDS 41 17 00(MOLIT, 2022)에 따라 결정된 설계 응답 스펙트럼을 기반으로 개발되었다. Fig. 8은 7개의 지진기록의 개별 응답 스펙트럼의 평균값과 목표 응답 스펙트럼을 비교한 것이다. 내진성능평가를 위한 지진파에 대한 자세한 설명은 Shin 등(2021), Sohn 등(2022a)을 참고하면 된다.

본 연구에서 제시한 단자유도모델이 실제 건물의 지진응답을 적절히 모사하였는지 상세 모델과 비교해 보았다. 두 모델 모두 최대층간변위비로부터 내진성능을 평가했다. 상세 모델의 지진응답 결과 건물의 내진성능 수준은 C.P. 수준으로 평가되었고, 제안된 기법에 의한 단자유도모델 또한 건물의 내진

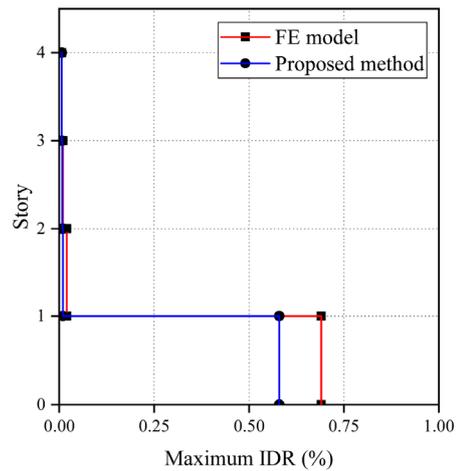


Fig. 9 Comparison of maximum interstory drift ratio between FE model and proposed model

성능 수준을 C.P. 수준으로 평가되었다. 모델 간 최대층간변위비는 약 15.9%의 차이를 보였다. 하지만, 두 모델 모두 건물의 내진성능을 같은 성능 수준으로 평가한 것으로 보아 제안된 내진성능평가 기법의 실무에 있어 그 적용 가능성이 판단된다.

3.3 제안된 성능평가 기법을 통한 빠른보강전략

제안된 기법은 구조물의 지진 성능을 평가하고 개선하는 데 목적을 둔다. Fig. 10은 세 가지 입력 매개변수에 따라 제안된 모델의 최대 지진응답을 각 매개변수의 범위별로 나타낸 것이다. Fig. 10의 (a)에 나타낸 바와 같이 범위 내의 T 값이 증가함에 따라 최대층간변위비 값이 증가하는 경향을 보인다. 이는 T 값의 증가가 구조물의 초기 강성의 감소를 초래하여 횡변위가 증가했기 때문으로 보인다. (b)에 나타낸 바와 같이 범위 내의 SR 값이 증가함에 따라 모델의 최대층간변위비 값이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 SR 값이 증가할수록 구조물이 높은 횡방향 저항 능력을 갖추고 있음을 나타내었기 때문이다. (c)에서 나타낸 바와 같이 모델의 μ 값의 경우 4.0에 도달하기 전까지는 최대층간변위비가 늘어났다가 줄어드는 등 매개변수 μ 값에 의해 영향을 받았다. 하지만 μ 값이 4.0에 도달한 이후로는 최대층간변위비에 μ 값이 미치는 영향이 미미했다.

예비 보강계획은 입력 매개변수 T - SR - μ 의 목표값을 제공하여 실무자가 지진보강에 대한 설계 초기 단계에서 합리적인 판단을 내리도록 지원할 수 있다. Fig. 11은 입력 매개변수 T - SR - μ 를 이용하여 제안된 기법의 지진응답을 나타낸 그래프이다. 해당 모델의 최대층간변위비에 따른 내진성능평가 결과 C.P.(붕괴 방지) 수준을 가지고 있다면, 건물 구조에 보강 시스템을 설치하여 I.O.(즉시 점유) 또는 L.S.(생명 안전) 수준의 목표 성능을 충족하여야 한다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 목표

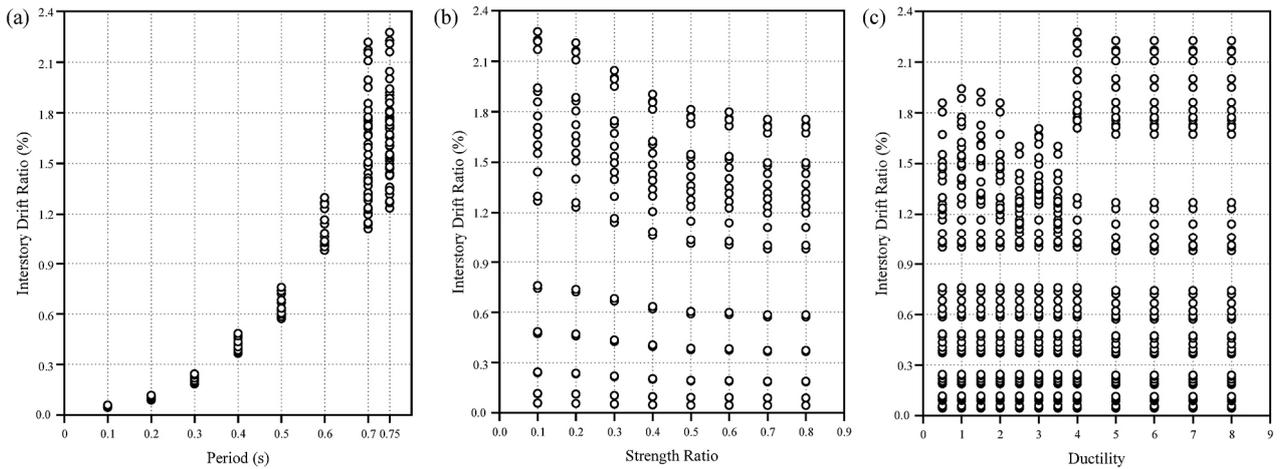


Fig. 10 Maximum dynamic responses from proposed model according to three input parameters: (a) Period, (b) Strength ratio, (c) Ductility

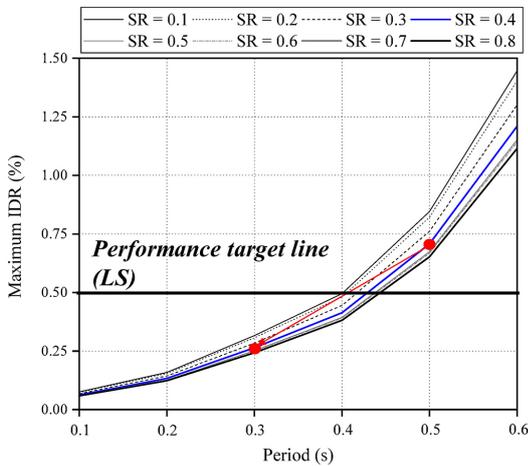


Fig. 11 Description of determining preliminary retrofit strategy using the $T-SR-\mu$ parameters

모델의 주기가 줄어들수록 최대층간변위비 또한 줄어들며, 내진성능 수준을 C.P. 수준에서 L.S. 수준으로 판단할 수 있다. 본 연구에서 제안된 기법은 실무자의 보강 계획에서 입력 매개변수값의 목표값을 제안하여 합리적인 판단을 도와준다. 간단한 입력 매개변수를 통하여 예측된 지진응답을 기반으로 건물의 보강 방안을 빠르게 수립할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 간단한 매개변수 $T-SR-\mu$ 를 통해 비선형 단자유도모델을 구축하여 건물의 내진성능을 평가하고 보강방안을 수립할 수 있는 기법을 제시한다. 하나의 $T-SR-\mu$ set을 가진 모델에 100개의 PEER 지진에 대한 output parameter로 최대층간변위비를 도출하였다. 계산된 최대층간변위비를 기반으로 건물의 내진성능을 평가했다. 해당 기법의 적합성을 판

단하기 위해 필로티형 RC 주거형 건물의 상세 모델을 개발하였다. 연구에서 제시한 기법과 상세 모델 간의 내진성능을 비교하여 그 적합성을 판단하였다. 이후, 세 가지 매개변수의 구조적정보를 통해 건물의 내진성능 수준을 만족하는 보강방안을 수립하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구는 건물의 내진 성능을 신속하게 평가하기 위해 비선형 단자유도모델(SDOF)을 개발했다. RC 주거형 건물(필로티형)을 목표로 연층을 갖는 건물의 동적 거동이 1차 모드에 크게 의존한다는 점에서 다자유도모델을 단자유도모델로 간략화할 수 있다. 지진에 의한 건물의 동적 응답을 모사하기 위하여 간단한 매개변수 $T-SR-\mu$ 로 정의되는 비선형 shear spring이 적용되었으며, 다양한 지진 하중 조건에서 output parameter인 최대층간변위비를 도출하였다. 이를 기반으로 신속하게 건물의 내진성능을 평가할 수 있다.
- 2) 본 연구는 주기(T), 강도비(SR), 연성(μ) 세 가지 주요 매개변수를 통해 다양한 SDOF 모델을 구축했다. 각 매개변수의 범위는 2017년 포항지진 당시 피해를 본 저층 및 중층 필로티형 RC 주거 건물의 구조에 초점을 두어 선정하였으며, 하나의 $T-SR-\mu$ set을 가지는 모델 768개가 개발되었다. 해당 모델에 100개의 PEER 지진 해석을 진행하였고, 최대층간변위비를 응답으로 총 76,800개의 datasets를 구축했다.
- 3) 본 연구는 제안된 모델링 방식을 통한 내진성능평가 기법이 실제 RC 주거형 건물의 합리적인 내진성능 수준을 판단할 수 있음을 확인했다. 상세 모델에 pushover analysis와 고유치 분석을 통해 $T-SR-\mu$ 값을 도출하여 단자유도모델의 매개변수로서 적용되었다. 다양한 지진에

대한 개별 응답 스펙트럼과 목표응답 스펙트럼을 비교하여 상세 모델의 지진응답을 구하고 제안된 기법을 통하여 단자유도모델의 지진응답을 구하였다. 상세 모델과 제안된 기법 모두 건물의 내진성능을 CP 수준으로 평가하였다. 각 모델 간 최대층간변위비는 15.9%의 차이를 보였으나, 두 모델 모두 건물의 내진성능을 같은 수준으로 판단했다. 이를 통해 제안된 내진성능평가 기법의 유효성이 뒷받침된다.

- 4) 본 연구는 지진에 대비한 예비보강계획에 입력 매개변수 $T-SR-\mu$ 의 목표값을 제공하여 실무자가 지진보강 설계 초기 단계에서 합리적인 판단을 내리도록 도움을 준다. 내진 보강 전략 산정을 위하여 수직 비정형성을 가지는 RC 주거형 건물 중 필로티형 건물을 목표로 지정했다. 해당 건물의 입력 매개변수 $T-SR-\mu$ 값을 HAZUS와 서울의 통계 데이터를 기반으로 조절하였으며, 내진성능평가 결과 CP 수준임을 확인했다. RC 주거형 건물의 주기와 강도비 변화에 따른 최대층간변위비 그래프를 통해 보강계획 시 $T-SR-\mu$ 의 목표값을 제공하여 건물의 보강 방안을 빠르게 수립할 수 있었다.

단, 주거 건물의 경우 비구조 요소가 상당 부분을 차지하고 보강 결정은 지진 손실 평가와 관련된 비용과 이익에 대한 분석이 필요하다. 따라서, 향후 연구에서는 제안된 방법이 실무에서 부딪히는 다양한 상충 문제를 해결하는 데 도움이 되도록 손실 평가로 확장되어야 한다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00220019).

References

- AIK (2018) Site Inspection and Damage Investigation of Buildings by Earthquakes in Gyeongju and Pohang, Seoul, Korea: Spacearts Co., Architectural Institute of Korea (AIK). (In Korean)
- ASCE (2023) Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-23, American Society of Civil Engineers.
- Bo, H., Chen, X., Zhen, X., Xin-zheng, L.U. (2014) A Multi-Story Concentrated-Mass Shear Model for Urban Regional Seismic Damage Prediction and Associated Parameter Determination, *Eng. Mech.*, 31, pp.73-78.
- Calvi, G.M., Priestley, M.J.N., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement-based Seismic Design of Structures, *In New Zealand Conference on Earthquake Engineering*, IUSS press.
- Chopra, A.K., Chintanapakdee, C. (2004) Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analyses: Vertically “Regular” and Irregular Generic Frames, *Earthq. spectra*, 20(1), pp.255~271.
- Dya, A.F.C., Oretaa, A.W.C. (2015) Seismic Vulnerability Assessment of Soft Story Irregular Buildings using Pushover Analysis, *Proc. Eng.*, 125, pp.925~932.
- FEMA (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building, Report No. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA (2005) Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, *FEMA-440*, Redwood City, 7(9), 11.
- FEMA (2012) Hazus-MH 2.1 Technical Manual: Earthquake Model.
- Hori, M., Ichimura, T. (2008) Current State of Integrated Earthquake Simulation for Earthquake Hazard and Disaster, *J. Seismol.*, 12, pp.307~321.
- Kim, J.C., Shin, S.H., Oh, S.H. (2019) Damage Investigation of Pilotis Structures and Analysis of Damage Causes by Pohang Earthquake, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 35(3), pp.3~10.
- Kim, T., Chu, Y., Kim, S.R., Bhandari, D. (2018) Seismic behavior of Domestic Piloti-Type Buildings Damaged by 2017 Pohang Earthquake, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 22(3), pp.161~168.
- Kircher, C., Deierlein, G., Hooper, J., Krawinkler, H., Mahin, S., Shing, B., Wallace, J. (2010) Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors, *NIST GCR 10-917-8*, National Institute of Standards and Technology.
- Latcharote, P., Terada, K., Hori, M., Imamura, F. (2018) A Prototype Seismic Loss Assessment Tool using Integrated Earthquake Simulation, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 31, pp. 1354~1365.
- Lee, H.S., Ko, D.W. (2002) Shaking Table Tests of a High-Rise RC Bearing-Wall Structure with Bottom Piloti Stories, *J. Asian Archit. & Build. Eng.*, 1(1), pp.47~54.
- Lee, H.S., Ko, D.W. (2007) Seismic Response Characteristics of High-Rise RC Wall Buildings Having Different Irregularities in Lower Stories, *Eng. Struct.*, 29(11), pp.3149~3167.
- MOLIT (2021) Guideline for Seismic Performance Evaluation of Existing Buildings, Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- MOLIT (2022) Seismic Design Code for Buildings (KDS 41 17

- 00). Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Moon, E.C., Baek, E.R., Lee, S.H.** (2018) Influence of Inter-Story Strength and Stiffness Ratios on the Seismic Performance of RC Pilotis Type Building, *J. Korea Concr. Inst.*, 30(6), pp. 633~640.
- Sextos, A.G., Katsanos, E.I., Manolis, G.D.** (2011) EC8-based Earthquake Record Selection Procedure Evaluation: Validation Study based on Observed Damage of an Irregular R/C Building, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 31(4), pp.583~597.
- Shin, J., Choi, I., Kim, J.H.** (2021) Rapid Decision-Making Tool of Piloti-Type RC Building Structure for Seismic Performance Evaluation and Retrofit Strategy using Multi-Dimensional Structural Parameter Surfaces, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 151, p.106978.
- Shin, J., Kim, J.H., Lee, K.** (2014) Seismic Assessment of Damaged Piloti-Type RC Building Subjected to Successive Earthquakes, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 43(11), pp.1603~1619.
- Sohn, J., Choi, I., Kim, J.H.** (2020) Effect of Vertical Irregularity on Displacement Concentration in Building Seismic Design based on Linear Analysis, *J. Archit. Inst. Korea*, 36(6), pp. 193~200.
- Sohn, J.H., Choi, I., Kim, J.H.** (2022a) Development of Limit States for Seismic Fragility Assessment of Piloti-Type Structures Verified with Observed Damage Data, *Eng. Struct.*, 251, Part B, p.113562.
- Sohn, J., Choi, I., Kim, J.H.** (2022b) Drift-based Limit States Through Seismic Fragility Assessment for Piloti-Type Building Structures, *J. Archit. Inst. Korea*, 38(6), pp.205~211.
- Zeng, X., Lu, X., Yang, T.Y., Xu, Z.** (2016) Application of the FEMA-P58 Methodology for Regional Earthquake Loss Prediction, *Nat. Hazards*, 83, pp.177~192.

요 지

지진발생 시, 건물은 작게는 손상에서 크게는 붕괴까지 이어지므로 인명과 재산상의 피해가 생길 수 있다. 이러한 지진의 위험성에 대비하여 건물의 내진성능평가가 필요하다. 현재 내진성능평가 기법의 경우 개별 건물을 대상으로 하기에 많은 시간이 투자되어야 한다. 따라서, 지역규모의 건물들을 대상으로 하는 내진성능평가 기법의 개발이 필요한 실정이다. 본 연구는 RC 주거형 건물의 내진성능을 평가하고 보강계획을 수립하기 위해 비선형 Shear Spring을 가진 단자유도모델을 구축하였다. 구조물의 비선형 응답을 모사하기 위한 비선형 Shear Spring은 T-SR- μ 를 매개변수로 정의된다. 해당모델에 100개의 PEER 지진을 적용하여, 최대층간변위비 응답으로 건물의 내진성능을 평가하였다. 제안기법의 적용성을 확인하기 위하여 상세모델과 비교하였을 때, 두 모델 모두 건물의 내진성능을 같은 수준으로 판단하였음을 확인하였다. 본 연구는 제안된 방식이 실제 건물의 내진성능을 예측할 수 있음을 보여주었다.

핵심용어 : 단자유도모델, 철근콘크리트 주거형 건축물, 내진성능평가, 내진보강