강성기반 연층비를 활용한 주거형 필로티 건축물의 내진성능예비평가 기법 개발

최재혁¹·최인섭²·김준희^{3†}·손정훈⁴

¹연세대학교 건축공학과 석사과정, ²연세대학교 건축공학과 박사후 연구원,
³연세대학교 건축공학과 부교수, ⁴연세대학교 건축공학과 석사후 연구원

Development of Preliminary Seismic Performance Evaluation Method for Residential Piloti Buildings Using Stiffness-Based Soft Story Ratios

Jae-Hyuk Choi¹, Insub Choi², JunHee Kim^{3†} and JungHoon Sohn⁴

¹Graduate Student, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

²Postdoctoral Researcher, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

³Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

⁴Postmaster Researcher, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

Abstract

There have been many instances of damage to buildings with soft stories, and it is important to consider vertically irregular buildings when evaluating the seismic performance of existing buildings. However, because conventional methods do not easily reflect vertical irregularities with sufficient accuracy, it is possible to underestimate or overestimate the seismic performance of buildings with vertical irregularities. This study aims to develop a seismic performance evaluation method for vertically irregular buildings using the stiffness-based soft story ratio (SSR), which is a parameter that represents the ratio of the demand and the capacity for displacement and refers to the ratio of displacement concentration in buildings. The seismic performance evaluation method developed in this study is compared with the conventional seismic performance evaluation method for four piloti buildings, using the first-floor column as a variable. Conventional seismic performance evaluation methods often overestimate the seismic performance for models in which vertical irregularities are maximized. However, results of the proposed seismic performance evaluation method are identical to those from a detailed evaluation for all models. Therefore, it is considered that the proposed seismic performance evaluation method can provide more precise seismic performance evaluation results than conventional methods in the case of piloti buildings, where vertical irregularities are maximized.

Keywords : seismic performance evaluation, vertical irregularity, soft story ratio, stiffness ratio, preliminary evaluation

1. 서론

층강성의 차이로 유발되는 수직비정형성인 연층(Soft Story)을 가지는 건축물은 지진에 대해 해당 층에 변위가 집중되는 취약한 특성을 가진다. 과거 샌 페르난도, 로마 프리에타, 노스 리지, 터키지진의 사례를 다룬 연구를 살펴보면, 연층을 가지는 건축물에서 해당 층의 부재가 항복하여 붕괴로 이어지는 등 큰 지진피해가 발생하였다(Mahin *et al.*, 1976; Harris and Egan,

1992; Moehle, 1995; Bayraktar *et al.*, 2013). AIK(Architectural Institute of Korea, 2018)에 따르면 특히 2017년 11월 15일 발생한 포항지진에서는 연층의 효과가 극대화된 필로티 건축물에서 다수의 붕괴 사례가 관측되어 국내에서도 수직비정형을 가지는 건축물에 대한 내진성능평가가 중요해졌다.

국토교통부와 한국시설안전공단은 지진으로부터 국민의 안전을 보호하기 위해 기존 건축물의 내진성능평가 및 내진보강을 체계적으로 수행할 수 있도록 ‘기존 시설물 내진성능평가

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-2783; E-mail: junhkim@yonsei.ac.kr

Received April 21 2021; Revised May 31 2021;

Accepted June 7 2021

© 2021 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(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

및 향상 요령'을 2004년에 제정하고 2019년에 개정하여 운영 중에 있다. 이 평가요령은 예비평가와 상세평가의 2단계로 구성되어 있다. 예비평가의 목적은 다수의 저층 건축물을 대상으로 간략하게 내진성능을 평가하여 상세평가가 요구되는 건축물을 선정하기 위한 목적으로 개발되었다. 예비평가는 기본적으로 요구량(Demand)/저항능력(Capacity)의 비(demand to capacity ratio, DCR)에 의한다. DCR은 지진하중에 저항하는 수직 부재의 재료 강도와 단면 수치로부터 개략적인 횡하중 저항능력을 나타내는 지표로서 이는 강도측면에서 내진성능을 보수적으로 평가하는 파라미터이다. 2019년에는 비정형성이 있는 건축물도 비정형에 따른 내진성능 저하효과를 고려함으로써 예비평가를 수행할 수 있도록 수정하였고, 층수의 제한도 삭제되었다. 하지만 수직비정형은 강성비의 차이에 의하여 발생하므로 강도측면에서 내진성능을 평가하는 DCR은 수직비정형을 가지는 건축물에 대해 내진성능을 보수적이지 못하게 평가하는 경우가 발생할 수 있다. 이때 예비평가에서 평가 결과가 목표성능을 만족하여 상세평가를 진행하지 않는다면, 해당 건축물의 내진성능을 과대평가하게 된다. 위와 같은 사례의 예제 건축물은 4장에서 다룬다.

본 연구에서는 기존 강도기반 내진성능 예비평가에서 수직비정형을 충분히 반영하지 못하는 문제점을 해결하기 위해 demand와 capacity 측면에서 수직비정형을 고려한 강성기반 연층비(soft story ratio, SSR)를 제안하였다. 또한, 제안한 SSR을 통해 수직비정형 건축물의 내진성능평가 기법을 개발하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 수직비정형이 고려된 강성기반 내진성능평가 기법

2.1 기존 강도기반 내진성능예비평가 기법의 한계

Choi 등(2017)과 Sohn 등(2020)의 연구에 따르면 층과 강성에 따른 변위집중 비율이 다르고 또한, 연층을 가지는 경우에도 층강성의 차이에 의한 변위 기여도가 다르다. 따라서 취약층을 평가할 때, demand 측면에서 층강성의 차이에 의한 수직비정형 및 층별 변위 기여도를 고려해야 한다. 하지만 DCR은 demand 측면에서 횡력분포를 역삼각형으로 가정한 전단력 분포계수를 사용하고, 건축물의 비정형성을 지나치게 개략적으로 고려한다. i 층의 DCR은 식 (1)로 정의된다.

$$DCR_i = \frac{S_{XS} \cdot W \cdot \gamma_i}{C_i \cdot \lambda_s} \quad (1)$$

여기서, S_{XS} 는 단주기 스펙트럼가속도(g), W 는 구조물의 총

중량(kN), γ_i 는 층전단력 분포계수, C_i 는 i 층의 저항능력, λ_s 는 비정형성에 의한 구조물의 저항능력 감소를 고려하기 위한 비정형계수이다. 층전단력 분포계수와 비정형계수는 각각 식 (2)와 (3)으로 구한다.

$$\gamma_i = \frac{\sum_{l=i}^n w_l h_l^k}{\sum_{l=1}^n w_l h_l^k} \quad (2)$$

$$\lambda_s = 0.9^m \quad (3)$$

여기서, n 은 구조물의 층수, w_l 는 l 층의 유효중량(kN), h_l 은 밑면으로부터 l 층까지 높이(m), k 는 건물주기에 따른 횡력분포계수, m 은 '기존 시설물(건축물) 내진성능평가 요령'에 기재되어 있는 6개의 비형정성을 나타내는 항목 중에 해당하는 수를 의미한다.

식 (2)의 층 전단력 분포계수를 보면, k 를 1로 가정하기 때문에 Fig. 1처럼 층 전단력이 선형으로 증가하는 역삼각형 형태의 횡력분포를 가지게 된다. 이는 층고를 반영할 뿐 각 층의 강성은 반영하지 못하기 때문에 demand 측면에서 강성 차이로 인해 발생하는 연층을 반영하기는 부족하다. 따라서 수직분포계수를 사용하는 하중분포를 demand 측면에서 고려해야 한다.

강도기반으로 횡하중 저항성능을 평가하는 DCR의 경우, 2019년도에 비정형성에 의한 구조물의 저항능력 감소를 고려하기 위한 비정형계수를 추가하여 개정되었지만 여전히 연층을 충분히 고려하지 못한다. 식 (3)의 비정형성계수를 보면 0.9의 거듭제곱 꼴로, '기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령'에 기재되어 있는 6개의 비정형성을 나타내는 항목 중 해당하는 수만큼 0.9를 곱하여 구조물의 저항성능을 낮게 평가한다.

Fig. 1 Comparison of the lateral force distributions in static and dynamic analysis

즉, 비정형성의 유형과 비정형성의 정도를 고려하지 않고 해당하는 항목의 수만큼 저항성능을 90%로 낮추어 평가한다. 이는 건축물의 연층을 지나치게 개략적으로 고려한다고 볼 수 있다. 연층은 강성비의 차이로 인해 발생하므로 연층의 capacity를 평가하기 위해선 직접적으로 영향을 미치는 층강성을 capacity 측면에서 고려해야 한다.

2.2 강성기반 연층비(soft story ratio)

기존 내진성능 예비평가 기법에서 사용되는 강도기반 DCR은 건축물에서 각 층의 강성비 차이에 의한 연층효과를 직접적으로 고려하지 못한다. 본 연구에서는 층의 강성비 차이에 대한 연층효과를 정량화하기 위해 각 층의 강성비에 대한 변위비를 나타내는 연층비(soft story ratio, SSR)를 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$SSR_x = \frac{\sum_{i=x}^n C_{vi}}{LSR_x} \quad (4)$$

C_{vx} 는 x 층의 1차 수직분포계수로 식 (5)와 같이 정의되며, 선형모델일 경우 하중분포비율을 결정하는 수직분포계수는 각 층의 변위비와 동일하다. 수직분포계수는 질량참여율이 90% 이상이 되는 모드의 수를 고려해야 한다. 본 연구의 대상 건축물인 수직비정형을 갖는 5층 이하의 건축물은 해석결과 1차 모드참여율이 90% 이상으로 분석되어, 1차 모드만 고려하여 수직분포계수를 정의하였다. LSR_x 는 x 층의 강성비로 식 (6)과 같이 정의되며, 1층의 강성에 대한 대상 층의 강성비를 의미한다.

$$C_{vx} = \frac{w_x \phi_x}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_i} \quad (5)$$

$$LSR_x = \frac{k_x}{k_1} \quad (6)$$

여기서, w_i , w_x 는 i 층 또는 x 층의 유효중량(kN), ϕ_i , ϕ_x 는 1차 모드 벡터의 i 층 또는 x 층 성분, k_x 는 x 층의 층강성, k_1 은 1층의 층강성을 의미한다. 각 층의 층강성은 기둥과 벽이 병렬로 연결되어 있다고 가정하고 기둥과 벽의 강성 합으로 계산한다. 건축물에서 슬래브를 강한 격막이라고 가정하면 벽과 기둥은 양단고정의 상태가 되고 기둥의 강성을 산정하는 식은 (7), 벽의 강성을 산정하는 식은 (8)이다.

$$k_c = \frac{12E_c I_c}{L^3} \quad (7)$$

Fig. 2 Illustration of definition of soft story ratio (SSR_x), vertical distribution factor (C_{vx}) and lateral stiffness ratio (LSR_x)

$$k_w = \frac{12E_w I_w}{H^3} \quad (8)$$

여기서, k_c 는 기둥의 강성(kN/m), E_c 는 기둥의 탄성계수(MPa), I_c 는 기둥의 전단면이차모멘트(m^4), L 는 기둥의 길이(m), k_w 는 벽의 강성(kN/m), E_w 는 벽의 탄성계수(MPa), I_w 는 벽의 전단면이차모멘트(m^4), H 는 벽의 높이(m)를 의미한다.

SSR_x 은 x 층부터 상부층까지의 누적변위비를 강성비로 나눈 값으로, SSR_x 값이 높을수록 대상층의 강성에 비해 변위의 집중이 크다는 것을 의미하므로 변위집중에 대한 연층효과를 수치적으로 비교할 수 있다. Fig. 2는 연층비 SSR 를 개념적으로 나타낸 그림으로, 1층에 대한 각 층의 층강성 대비 집중되는 변위비로 표현된다.

2.3 강성기반 연층비를 활용한 내진성능평가 기법

개발한 SSR 을 통한 내진성능평가 기법의 flowchart는 Fig. 3과 같다. 기존 내진성능평가 기법에 SSR 을 이용한 판별이 추가된 형태이다. 진하게 음영처리된 부분이 기존의 내진성능평가 기법이고, 연하게 음영처리된 부분이 SSR 을 이용한 판별이다. 먼저 대상건축물과 같은 질량과 강성을 가지는 간략 모델을 제작하여 고유치해석을 통해 모드벡터를 도출한다. 간략 모델의 SSR 을 계산하고 3장에서 제시하는 한계값과 비교한다. 계산한 SSR 이 한계값 보다 클 경우, 건축물의 수직비정형을 강도기반 예비평가에서 충분히 고려하기 어렵다고 판단하여 예비평가를 거치지 않고 상세평가를 시행한다. SSR 이 한계값 보다 작을 경우, 강도기반 예비평가에서 반영 가능한 수준의 수직비정형을 가지고 있다고 판단하여 DCR을 통한 기존 강도기반 내진성능예비평가를 진행한다.

Fig. 3 Flow chart of seismic performance evaluation method through soft story ratio (SSR)

3. 수직비정형 건축물의 연층비 분석

3.1 층강성의 차이에 따른 연층비의 경향 분석

층강성의 차이에 따른 SSR의 경향을 분석하기 위해 각 층의 질량이 동일하고, 1층을 제외한 나머지 층의 강성이 동일한 5-DoF의 간략 모델을 제작하여, 상부층에 대한 1층의 강성비에 따른 층별 SSR을 도출하였다. 도출한 층별 SSR의 합계를 1로 정규화한 뒤 Fig. 4에 나타냈다. 가로축은 1층의 강성을 상부층의 강성으로 나눈 값이고 세로축은 정규화한 SSR이다. 해석에 대한 변수로 상부층에 대한 1층의 강성비를 0.1에서 1까지 사용하였다. 1층의 SSR은 1층과 상부층의 강성이 동일할 때 가장 작고, 강성비가 감소함에 따라 SSR이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면 나머지 층의 SSR은 강성비가 감소할수록 작은 값을 가져 1층의 SSR과 차이가 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 1층의 강성이 작아질수록 연층의 효과가 극대화되어 나타나는 것을 의미한다.

Fig. 4 Soft story ratio (SSR) of each story of 5-DoF simplified model according to stiffness ratio

3.2 층수와 연층비의 관계 분석

층수와 연층비의 관계를 분석하기 위해 각 층의 질량이 동일하고, 1층을 제외한 나머지 층의 강성이 동일한 2~5 DoF 간략 모델을 제작하여 층별 SSR을 도출하였다. 도출한 층별 SSR의 합계를 1로 정규화한 뒤 1층의 정규화된 SSR을 Fig. 5에 도시하였다. 가로축은 1층의 강성을 상부층의 강성으로 나눈 값이고 세로축은 정규화한 SSR이다.

2-Dof는 0.1에서 1의 강성비에 따라 0.62~0.95, 3-Dof는 0.45~0.91, 4-Dof는 0.35~0.87 5-Dof는 0.28~0.83 범위의 SSR을 가진다. 모든 층의 SSR 합계를 1로 정규화하였으므로, 건축물의 층수가 낮을수록 1층의 SSR이 커진다. 따라서 같은 강성비를 가지더라도 간략 모델의 자유도 개수에 따라 SSR이 다른 것을 확인할 수 있다. 또한, 자유도가 많은 모델일수록 강성비에 따른 SSR의 기울기가 크다. 즉, 상부층에 대한 1층의 강성비가

Fig. 5 Soft story ratio (SSR) of first story of each simplified models (2~5 DoF) according to stiffness ratio

갈더라도, 건축물의 높이와 층수에 따라 변위가 집중되는 비율이 달라지며 내진성능평가시 이를 고려해야 한다.

3.3 정밀해석을 통한 연층비 검증

SSR을 검증하기 위해 상세 모델을 제작하였다. 상세 모델은 모멘트 저항 골조이고 높이는 20m인 5층 2경간 2D frame이다. 1층의 강성비에 따른 SSR을 도출하기 위하여 1층의 층고를 4m에서 5.8m 까지 0.2m 씩 증가시켜 10개의 모델을 제작하였다. 이때의 층강성은 각 층의 기둥 강성의 합으로 하였고, 수직분포계수는 고유치해석을 통해 도출하였다.

상세 모델 10개의 SSR과 3.1 장에서 도시한 5-DoF 간략 모델의 SSR을 Fig. 6에 함께 도시하여 비교하였다. 5층의 SSR은 간략 모델과 상세 모델이 동일하였고, 1, 2, 3, 4층의 SSR는 저층일수록 상세 모델이 작다. 전체적으로 1층의 SSR은 강성비가 큰 모델일수록 작고, 2, 3, 4, 5층의 SSR은 강성비가 큰 모델일수록 크다. 상세 모델과 간략 모델의 SSR은 차이가 있지만 개형이 근사하다. 이러한 경향은 수직비정형을 가지는 5층 건축물의 SSR을 검토할 때, 동일한 강성비와 질량을 가지는 간략 모델로 단순화시켜 해석한 값의 신뢰성을 보여준다.

3.4 상세평가의 판단을 위한 연층비의 한계값

KCSC(2019)에서 발간한 건축물 내진설계기준 KDS 41 17 00에서는 수직비정형성에 관한 여러 유형을 정의하고 있다. 수직비정형성의 유형 중 ‘강성비정형-연층’은 ‘어떤 층의 횡강

Fig. 6 Compare soft story ratio (SSR) of each story of simplified model (5-DoF) and detailed model (5-story) according to stiffness ratio

Table 1 Limit values of SSR for 2~5 story buildings

	2-Story	3-Story	4-Story	5-Story
Limit value	0.709	0.545	0.442	0.370

성이 인접한 상부층 횡강성의 70% 미만이거나 상부 3개 층 평균강성의 80% 미만인 연층이 존재하는 경우’라고 정의하고 있다. 본 연구에서는 이 규정을 상세평가가 필요한 건축물을 판별하는 기준으로 선정하였다. 각 층의 질량이 같은 간략 모델에서 1층의 강성이 나머지 층의 70%일 때 1층의 SSR을 한계값이라고 정의하였다. 2.3장에서 설명했듯이 대상 건축물과 같은 질량과 강성을 가지는 간략 모델로 치환했을 때 1층의 SSR이 제시한 한계값을 초과한다면 강도기반 내진성능 예비평가로는 반영할 수 없는 수준의 연층효과가 발생하는 것으로 판단하였다. 예비평가의 대상이 되는 저층건축물인 2~5 층 건축물에 대해 SSR 한계값을 Table 1에 표기하였다.

4. 제안된 내진성능평가 기법의 적용성 분석

4.1 수직비정형 건축물의 해석모델

본 장에서는 기존의 내진성능평가 기법과 제안된 기법의 평가 결과를 비교하기 위한 예제 모델로 수직비정형 건축물의 해석 모델을 제작하였다. 해석 모델은 상용해석 프로그램인 MIDAS-Gen을 사용하였으며, 포항지진에 의해 피해를 입은 필로티 건축물의 도면을 기반으로 Fig. 7과 같이 제작하였다. 국내 저층 필로티 건축물은 85% 이상이 4층 구조를 갖는 것을

Fig. 7 Example piloti structure (a) Plan of ground floor, (b) Plan of second floor, (c) Section of X-direction, (d) Section of Y-direction (unit: mm)

Fig. 8 Plastic hinge modeling for nonlinear behavior of element

고려하여(AIK, 2018) 4층으로 설정하였다. 수직비정형이 내진성능에 미치는 영향만을 고려하기 위해 전단벽의 배치를 간략화하였고, 1층 전단벽의 유무에 따른 내진성능을 분석하기 위해 x축 방향으로만 1층 전단벽을 배치하였다. 도면에 포함되지 않은 재료강도는 KISC(2019)에 따라 결정하였다. 해석 모델의 하중은 필로티 건축물의 슬라브 마감을 고려하여 고정 하중을 4.55kN/m^2 로 설정하였으며, 활하중은 KBC 2016를 참고하여 근린생활시설 기준층 2.0kN/m^2 과 옥상층 1.0kN/m^2 으로 설정하였다.

필로티 건축물은 연층에 그 변위가 집중됨을 고려하여, 1층 부재의 비선형 거동을 구현할 수 있도록 모델링하였다. 비선형 거동은 Fig. 8과 같은 소성힌지를 적용하여 구현하였으며, 힌지 특성은 KISC(2019)의 기준을 참고하여 설정하였다. 기둥 부재에 작용하는 축력과 모멘트를 동시에 고려하기 위해 압축연단의 변형률이 0.003에 도달할 때의 축력과 모멘트 상관 관계를 고려하여 휨강도를 산정하였다.

4.2 대상 건축물의 내진성능평가 결과

상부층에 대한 1층의 강성비가 수직비정형 건축물의 거동에 주는 영향을 분석하기 위해 1층 기둥 크기를 변수로 한 4개의 해석 모델을 제작하였다. 기둥의 면적은 동일하게 유지하였으며, 기둥의 형상비를 각각 1, 1.5, 2, 2.5로 설정하였다. Fig. 9는 각 모델의 비선형정적해석 결과를 pushover curve로 나타낸 것이다.

각 모델의 pushover curve는 형상비가 증가할수록 X축 방향의 최대하중이 증가하며, Y축 방향의 최대하중 감소하는 경향을 보인다. 이는 기둥의 형상비가 증가할수록 X축 방향의 기둥의 두께가 증가하고, Y축 방향의 기둥의 두께는 감소하기 때문으로 분석된다. 또한, X축의 최대하중이 Y축보다 높지만, 더 작은 변위에서 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는

Fig. 9 Pushover curves of piloti models (a) X-direction (b) Y-direction

x축 방향으로 배치되어 있는 1층의 전단벽이 기둥에 비해 최대강도가 높지만, 더 작은 변위에서 파괴가 발생하기 때문으로 분석된다. 또한, 형상비가 1인 model 1의 y축 고유주기는 0.35초로, 모멘트골조와 전단벽 구조의 근사고유주기인 0.31~0.42초 범위에 존재하기 때문에 모델의 신뢰성을 확보했다고 할 수 있다.

4.3 제안기법과 기존 기법과의 내진성능평가의 결과 비교분석

4.2장에서 제시된 4가지 모델에 대하여 기존의 내진성능평가와 SSR을 이용한 내진성능평가 기법을 적용하여 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 기존 방법을 수직비정형 건축물에 적용할 경우, 모델 1의 예비평가 결과는 붕괴방지 수준, 모델 2, 3, 4의 예비평가 결과는 인명안전 수준으로 나타났다. 모델 2, 3, 4의 경우, 예비평가에서 목표성능인 인명안전 수준을 만족하였기 때문에 상세평가를 수행하지 않아도 되는 것으로 평가되었다. SSR을 이용한 방법의 내진성능평가의 결과는 모델 1, 2, 3은 붕괴방지 수준, 모델 4는 붕괴 수준으로 나타났다. 모델 1, 2,

Table 2 Comparison of seismic performance evaluations by conventional method and developed method

Model No.	Conventional Method					Developed Method							Seismic Performance
	Preliminary Evaluation		Detailed Evaluation		Evaluated Performance	SSR Limit Value=0.442		Preliminary Evaluation		Detailed Evaluation		Evaluated Performance	
	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir		X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir	X-dir	Y-dir		
1	I.O	C.P	-	C.P	C.P	0.487	0.507	-	-	I.O	C.P	C.P	C.P
2	I.O	L.S	-	-	LS	0.488	0.507	-	-	I.O	C.P	C.P	C.P
3	I.O	L.S	-	-	LS	0.489	0.507	-	-	I.O	C.P	C.P	C.P
4	I.O	L.S	-	-	LS	0.490	0.506	-	-	I.O	C	C	C

3의 경우, x축과 y축 모두 4층 건축물의 SSR 한계값인 0.442을 초과하여 예비평가를 하지 않고 상세평가를 진행하였으며 붕괴방지 수준으로 평가되었다. 모델 4는 x축의 SSR이 한계값인 0.442을 초과하지 않았지만, y축의 SSR이 한계값을 초과하여 상세평가를 진행하였으며 붕괴 수준으로 평가되었다.

결과적으로 모든 모델에 대해 제안된 내진성능평가 기법에 서 상세평가가 수행되었고 모두 붕괴방지 혹은 붕괴 수준의 내진성능을 가진 것으로 평가되었다. 따라서 기존의 내진성능평가 기법은 2, 3, 4의 경우, 예비평가에서 수직비정형을 충분히 고려하지 못하여 내진성능이 인명안전 수준으로 과대평가되었다. 상부층에 대한 1층의 강성비가 과도하게 작은 경우에서 기존 내진성능평가 기법은 예비평가에서 내진성능을 과대평가할 가능성이 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 수직비정형 건축물이 예비평가에서 내진성능이 과대평가되는 문제를 해결하기 위해 강성기반 연층비(soft story ratio, SSR)의 한계값을 활용한 내진성능 예비평가기법을 개발하였다. SSR는 KDS 41 17 00에서 정의하고 있는 수직분포계수를 층강성으로 나눈 파라미터다. 1층 기둥의 강성을 변수로 하는 필로티 건축물들을 대상으로 개발한 내진성능평가 기법을 적용하여 기존의 내진성능평가 기법의 결과와 비교하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) SSR은 수직분포계수의 상부층까지 누적합을 층강성으로 정규화한 것으로 정의하였다. 수직분포계수는 모드 벡터와와 층 유효중량을 곱한 것의 층별 비율로, 수직비정형을 고려하는 층별 변형능력에 대한 요구량(demand)으로써 사용하였다. 수직비정형성에 의한 1층의 변위 집중현상은 강도 보다 강성이 직접적으로 관여하므로 층 강성비를 층별 변형능력(capacity)으로써 사용하였다. 따라서 SSR은 층 변형에 대한 요구량/변형능력의 형태를 띠고 있으며, 변위집중에 대한 연층효과를 수치적으로 비교할 수 있다.

- 2) SSR은 수직분포계수를 사용하므로 다른 층수를 가진 건축물에서 상층부에 대한 1층의 강성비가 동일하더라도 다른 SSR을 가진다. 건축내진설계기준의 수직비정형 유형 중 강성비정형에 대한 규정을 참고하여, 1층의 강성비가 70%인 경우를 상세평가가 필요하다고 판단하였다. 2~5층 건축물에 대해서 1층의 강성비가 70%일 때의 SSR(2층 건축물은 0.709, 3층 건축물은 0.545, 4층 건축물은 0.442, 5층 건축물은 0.370)을 한계값으로 제시하였다. 즉, 상부층에 대한 1층의 강성비가 같더라도, 건축물의 높이와 층수에 따라 변위가 집중되는 비율이 달라지며 내진성능평가시 이를 고려해야 한다.
- 3) 예제 필로티 건축물에서 1층에 전단벽이 없는 층에 대해서 기존의 기법은 예비평가에서 수직비정형을 고려하지 못해 내진성능을 과대평가하는 경우가 발생했다. 반면 SSR을 이용한 기법을 예제 필로티 건축물에 적용한 결과, 전단벽이 없는 층에 대해서 SSR이 제안한 한계값 보다 월등히 컸고, 이에 따라 모두 상세평가의 대상이 되어 붕괴방지 혹은 붕괴 수준의 내진성능을 나타냈다. 즉 수직비정형을 가지는 필로티 건축물 중 23%에 해당하는 한 방향으로만 벽체가 있는 경우에 대해서 본 연구에서 제시하는 내진성능평가 기법을 이용한다면 기존의 내진성능평가 기법보다 정밀하게 내진성능을 평가할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 2021년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: NRF-2021 R1A2C2007064).

References

Architectural Institute of Korea (2018) *Site Inspection and Damage Investigation of Building by Earthquakes in Gyeongju and Pohang*, Spacearts, p.327.

- Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Pehlivan, M.** (2013) Performance and Damages of Reinforced Concrete Buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, Earthquakes, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 53, pp.49~72.
- Choi, I., Jang, J., Kim, J.H.** (2017) Developement of Stochastic Seismic Performance Evaluation Method for Structural Performance Point Based on Capacity Spectrum Method, *J Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(6), pp.523~530.
- Harris, S.K., Egan, J.A.** (1992) Effects of Ground Conditions on the Damage to Four-Story Corner Apartment Buildings, *Loma Prieta Calif Earthq Oct. 17 1989-Marina Dist*, pp.181~194.
- Korea Construction Standards Center** (2019) *Korea Design Standard: Seismic Design Criteria for Buildings (KDS 41 17 00)*, The Ministry of Land, Infrastructure and Transport, p.122.
- Korea Infrastructure Safety Corporation** (2019) *Seismic Performance of Existing Structures (Buildings) Evaluation Technique*, The Ministry of Land, Infrastructure and Transport, p.190.
- Mahin, S.A., Bertero, V.V., Chopra, A.K., Collins, R.G.** (1976) Response of the Olive View Hospital Main Building during the San Fernando Earthquake, Report No. EERC, pp.76~22.
- Moehle, J.P.** (1995) Northridge Earthquake of January 17, 1994: Reconnaissance Report, Volume 1—Highway Bridges and Traffic Management, *Earthq. Spectra*, 11(3), pp.287~372.
- Sohn, J.H., 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.

요 지

연층을 가지는 건축물들의 피해사례가 관측됨에 따라 기존 건축물 내진성능평가시 수직비정형의 고려가 중요해졌다. 하지만 기존 방법은 수직비정형을 충분히 반영하기 어렵기 때문에 수직비정형을 가지는 건축물에 대해 내진성능을 과소 혹은 과대평가할 여지가 있다. 본 연구는 강성기반 연층비(Soft Story Ratio, SSR)를 이용해 수직비정형 건축물의 내진성능평가 기법을 개발하는데 목적이 있다. SSR은 변위에 대한 요구량과 능력의 비율을 나타내고, 강성차이에 의한 수직비정형을 고려하여 건축물의 변위집중 비율을 의미하는 파라미터다. 1층 기둥을 변수로 하는 필로티 건축물 네 개를 대상으로 개발한 내진성능평가 기법을 기존의 내진성능평가 기법과 비교하였다. 기존 기법은 수직비정형이 극대화되는 모델에 대해 내진성능을 과대평가하는 경우가 발생하였다. 반면 제안된 기법은 모든 모델에 대해서 상세평가의 결과와 동일했다. 따라서 제안하는 내진성능평가 기법은 수직비정형이 극대화되는 필로티 건축물에서 기존의 방법보다 정밀하게 내진성능평가 결과를 제공할 수 있다고 사료된다.

핵심용어 : 내진성능평가, 수직비정형, 연층비, 강성비, 예비평가