

기존 저층 필로티 건물의 스펙트럼 변위 기반 손상도 기준 개선

Improvement of Spectral Displacement-Based Damage State Criteria of Existing Low-Rise, Piloti-Type Buildings

김태원^{1)*}

Kim, Taewan^{1)*}

¹⁾강원대학교 건축토목환경공학부, 교수

¹⁾Professor, Department of Architectural, Civil, and Environmental Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

The Ministry of the Interior and Safety in Korea developed seismic fragility function for various building types in 2009. Damage states for most building types were determined by structural analyses of sample models and foreign references because actual cases damaged by earthquakes rarely exist in Korea. Low-rise, piloti-type buildings showed severe damage by brittle failure in columns due to insufficient stirrup details in the 2017 Pohang earthquake. Therefore, it is necessary to improve damage state criteria for piloti-type buildings by consulting actual outcomes from the earthquake. An analytical approach was conducted by developing analysis models of sample buildings reflecting insufficient stirrup details of columns to accomplish the purpose. The result showed that current spectral displacements of damage states for piloti-type buildings might be too large to estimate actual fragility. When the brittle behavior observed in the earthquake is reflected in the analysis model, one-fourth through one-sixth of current spectral displacements of damage states may be appropriate for existing low-rise, piloti-type buildings.

Key words: Damage state criteria, Piloti-type building, Seismic fragility, Non-ductile column, Pohang earthquake

1. 서론

행정안전부에서는 2005년부터 지진 발생 시 기상청에서 제공하는 지진 정보를 활용하여 전국적인 진도 분포도를 계산하고, 이 결과를 바탕으로 건축물 및 인명피해와 라이프라인 시설의 피해를 예측할 수 있는 ‘지진재해대응시스템(Earthquake Disaster Response System)’ 구축 작업을 시작한 후 지속적으로 개선하고 있다. 예측된 피해 결과는 ‘국가재난관리정보시스템(NDMS, National Disaster Management System)’을 통해 각 지자체에 통보되고, 지자체에서는 지진재해대응시스템의 피해 지역과 수준 등을 확인하여 지진 발생 후 대응에 활용한다.

지진재해대응시스템은 다시 내부적으로 여러 단계의 시스템으로 구분되는데 이중 ‘지진피해 손실추정 시스템’에서는 건축물, 인명, 및 라이프라인

인의 피해를 추정한다. 지진피해 손실추정 시스템에서 건축물 피해는 지진재해대응시스템 내의 ‘지진진도분포도 생성시스템’에서 제공하는 진도를 입력값으로 하는 피해예측모델에서 구조유형별로 산출하게 된다. 이 피해예측모델은 일반적으로 지진으로 인한 구조물 피해 또는 인명 손실을 평가하기 위해 지반 운동의 강도와 특정 응답 수준에 도달하거나 초과하는 확률로 정의되는 지진취약도 함수를 의미한다. 국내에서는 건축물에 대한 지진취약도 함수를 2009년 소방방재청에서 공식적으로 개발하였다[1].

국내 건축물의 지진취약도 함수는 건축물의 유형을 분류한 후 각각의 건축물 유형에 대해 해석 모델을 작성하고 푸시오버해석을 수행하는 방법으로 개발되었다. 이때 건축물 유형별로 특정 손상상태에 해당하는 손상도 기준을 산정하였고, 특정 지반 운동의 강도에 대해 이 손상도 기준을 초과하는 확률을 계산하는 것이 지진취약도 함수의 역할이다. 이때 손상도 기준은 지진으로 인한 건축물의 손상상태 정의로 결정되며, 인명 및 재산 피해, 건물의 기능수행 수준 등을 평가하는 데 적합해야 한다.

국내 지진취약도 함수의 손상상태 정의는 미국의 HAZUS[2]를 기반으로 하고 있다. HAZUS에서는 정의된 손상상태별로 건축물의 지진 피해 정

*Corresponding author: Kim, Taewan

E-mail: tkim@kangwon.ac.kr

(Received April 27, 2021; Revised May 31, 2021; Accepted May 31, 2021)

도를 구분할 수 있는 손상도 기준을 관련 문헌들을 참고하여 선정하였다. 미국은 지진으로 인한 피해사례가 매우 풍부하므로 HAZUS의 손상도 기준은 미국내 건축물의 실제 피해 결과를 잘 반영할 것으로 판단된다. 반면 국내는 지진취약도 함수 개발 당시에 지진으로 인한 피해사례가 거의 없었기 때문에 구조해석을 통해 얻은 건축물의 역량스펙트럼에 전반적인 거동이 반영되었다고 보고 역량스펙트럼의 형태와 FEMA 356[3]에서 제공하고 있는 성능수준별 층간변형각을 참고하여 손상도 기준을 정하였다.

지진취약도 함수에서는 특정 손상도 기준을 초과하는 확률을 산출하기 때문에 손상도 기준의 정확한 선정은 산출된 확률의 신뢰성을 확보하기 위해 매우 중요하다. 하지만 현 지진취약도 함수를 개발할 당시에는 국내에서 실제 지진 피해를 확인한 사례는 많지 않았기에 어쩔 수 없이 해외의 문헌에 의존할 수밖에 없었다. 그런데 2017년 포항에서 규모 5.4의 지진이 발생하여 건축물의 구조 및 비구조 피해를 실제로 확인할 수 있었다. 특히 필로티 건축물의 피해는 매우 광범위하게 나타났으며, 피해 결과를 통해 필로티 건물의 거동이 설계 및 상세가 매우 부실한 것을 확인할 수 있었다[4]. 따라서 이 연구에서는 필로티 건축물의 실제 피해 양상과 해석적 결과를 함께 분석하여 국내 필로티 건물에 적합한 손상도 기준을 제시하고자 한다.

2. 현 손상상태 분류 및 손상도 기준 분석

2.1 HAZUS의 손상상태 분류

현 지진취약도 함수의 손상상태 분류는 기본적으로 HAZUS를 기반으로 하고 있다. HAZUS에서는 건축물의 손상상태를 ‘Slight’, ‘Moderate’, ‘Extensive’, ‘Complete’의 4단계로 분류하고 개별 구조형식별로 손상상태를 기술하고 있다. 필로티 건축물은 벽체와 기둥이 혼합된 구조이므로 HAZUS의 ‘콘크리트 모멘트골조’와 ‘콘크리트 전단벽’에 대한 손상상태별 현상을 Table 1에 나타내었다. Slight는 구조 부재(기둥, 보, 및 벽체)에서 미세한 균열이 발생하거나 벽체에서는 일부 피복탈락이 발생하는 상태다. Moderate는 균열이 Slight에 비해 커지고 일부 부재는 항복강도에 도달하거나 초과하는 상태다. 연성 모멘트골조는 항복강도에 도달하나 비연성 모멘트골조는 전단 균열과 피복탈락이 발생하는 상태다. 비연성 모멘트골조가 전단강도에 도달하는 것은 파괴 또는 붕괴로 이어질 수 있으므로 연성 모멘트골조와 차등을 두는 것이다. 전단벽은 일부가 항복강도를 초과하고 사인장 균열과 단부에서 콘크리트 피복탈락이 확인되는 상태다.

Extensive는 연성 모멘트골조의 일부 부재가 극한강도를 초과하여 주철근에 좌굴이, 비연성 모멘트골조의 부재에서 전단파괴가 발생하여 부분 붕괴의 원인이 되는 기둥 주철근 좌굴이 발생하는 상태다. 전단벽에서는 벽체 대부분이 항복강도를 초과하며 일부는 극한강도를 초과하여 벽체를 관통하는 사인장균열과 철근의 좌굴이 발생하는 상태다. 전단벽 구조지만 내진설계 되지 않은 비연성기둥의 파괴로 인한 부분 붕괴가 발생할 수 있는 상태다. Complete는 구조물이 붕괴하거나 붕괴가 임박한 상태다. 이때 모멘트골조에서는 비연성부재의 취성파괴나 골조의 안정성 상실이, 전단벽에서는 벽체 대부분의 파괴 및 일부 주요한 보 또는 기둥의 파괴가 원인이다.

이를 간단히 정리하면 Slight는 일부 부재에 미세한 균열이 발생한 상태, Moderate는 균열이 전반적으로 발생하고 일부 부재가 항복하는 상태,

Table 1. Descriptions for structural damage states in HAZUS [2]

Damage state	Concrete moment frames	Concrete shear walls
Slight	Flexural or shear type hairline cracks in some beams and columns	Diagonal hairline cracks on most wall surfaces; minor concrete spalling at few locations.
Moderate	Most beams and columns exhibit hairline cracks. Ductile frames: some elements have reached yield capacity (larger flexural cracks and some concrete spalling). Nonductile frames: larger shear cracks and spalling.	Most wall surfaces exhibit diagonal cracks. Some walls have exceeded yield capacity (larger diagonal cracks and concrete spalling at wall ends).
Extensive	Ductile frames: Some elements have reached ultimate capacity (large flexural cracks, spalled concrete and buckled main reinforcement). Nonductile frames: Elements may have suffered shear failures or bond failures at reinforcement splices, or broken ties or buckled main reinforcement in columns which may result in partial collapse.	Most walls have exceeded yield capacities. Some walls have exceeded ultimate capacities (large, through-the-wall diagonal cracks, extensive spalling around the cracks and visibly buckled wall reinforcement or rotation of narrow walls with inadequate foundations). Partial collapse may occur due to failure of nonductile columns not designed to resist lateral loads.
Complete	Structure is collapsed or in imminent danger of collapse due to brittle failure of nonductile frame elements or loss of frame stability.	Structure is collapsed or in imminent danger of collapse due to failure of most of the shear walls and failure of some critical beams or columns.

Extensive는 일부 부재가 극한상태에 도달한 상태, Complete는 구조물이 붕괴하거나 붕괴가 임박한 상태다. 더불어 골조 부재(기둥, 보)와 전단벽의 손상상태별 기술이 약간 다르며, 골조에서는 특히 기둥이 연성인지 비연성 부재인지에 따라 같은 거동이 다른 손상상태에 해당한다는 것이 중요하다. 기존 국내 필로티 건축물의 기둥은 포항 지진에서 취성적인 거동을 보였으므로 이러한 HAZUS의 손상상태 기술을 잘 참고할 필요가 있다.

2.2 FEMA 356의 성능 수준 분류

현 지진취약도 함수에서는 손상도 기준을 FEMA 356에서 제시한 성능 수준별 층간변형각 값을 기초로 결정하였다. FEMA 356은 기존 건축물의 보수와 보강을 위한 성능목표를 설정하기 위해 구조적 성능 수준을 ‘Operational(OP)’, ‘Immediate Occupancy(IO)’, ‘Life Safety(LS)’, ‘Collapse Prevention(CP)’의 4단계로 분류하고 있다. FEMA 356은 이들을 다시 전반적인 손상도로 각각 ‘Very Light’, ‘Light’, ‘Moderate’, ‘Severe’로 정의하고 있다(FEMA 356, Table C1-2). Very Light와 Light는 구조체에 경미한 균열이 발생하고 건물의 기능에 문제가 발생하지 않는 상태로서 거의 같은 손상상태다. Moderate는 일정 수준의 영구 변형이 발생하나 수직부재가 중력을 지지할 수 있는 상태다. Severe는 큰 영구 변형이 발생하여 건물의 부분 또는 전체가 붕괴 직전인 상태다. FEMA 356의 4

Table 2. Descriptions for structural damage states in FEMA 356 [2]

Performance level	Concrete moment frames	Concrete shear walls
IO	Minor hairline cracking. Limited yielding possible at a few locations. No crushing.	Minor hairline cracking of walls
LS	Extensive damage to beams. Ductile columns: Spalling of cover and shear cracking. Nonductile columns: Minor spalling. Joint cracks.	Some boundary element stress, including limited buckling of reinforcement. Some sliding at joints. Damage around openings. Some crushing and flexural cracking.
CP	Ductile elements: Extensive cracking and hinge formation. Nonductile columns: Limited cracking and/or splice failure in some. Severe damage in short columns.	Major flexural and shear cracks and voids. Sliding at joints. Extensive crushing and buckling of reinforcement. Failure around openings. Severe boundary element damage.

단계 성능 수준별 손상도 정의는 HAZUS의 4단계 손상상태와 약간의 차이는 있으나 순서별로 각각 1:1로 대응시킬 수 있다.

FEMA 356에서도 HAZUS와 같이 구조형식에 따라 성능 수준별로 손상상태를 정의하고 있으며, 그중 콘크리트 모멘트골조와 전단벽에 대한 손상상태를 Table 2에 정리하였다. 참고로 OP 성능 수준에 대해서는 손상상태 정의를 제공하고 있지 않다. IO 수준은 구조체에 경미한 균열이 발생한 상태다. 콘크리트 모멘트골조의 경우 LS 수준은 연성과 비연성 기둥을 구분하여 전자는 피복탈락 및 전단 균열, 후자는 경미한 피복탈락이 발생한 상태다. CP 수준은 연성 기둥은 광범위한 균열과 힌지 형성, 비연성기둥은 제한된 균열 및 이음부 파괴가 발생한 상태다. 전단벽의 경우 LS 수준은 경계 요소에서 일부 주철근의 제한적인 좌굴 또는 일부 휨균열 및 압괴가, CP 수준은 심각한 휨 및 전단 균열, 광범위한 압괴 및 주철근 좌굴, 심각한 경계요소 손상 등이 발생한 상태다.

2.3 국내 행정기관의 피해 또는 성능 분류

국내 행정기관에서도 구조물의 피해 또는 성능을 수준별로 분류하고 있다. 행정안전부에서는 2019년 4월에 행정안전부 훈령 제85호로 ‘자연 재난에 대한 피해조사 및 복구 계획 수립 요령(이하 요령)’ 일부 개정안[5]을 수립하였다. 이 요령에서는 구조물의 피해 상태를 소파(Minor failure), 반파(Partial failure), 전파(Complete failure)의 3단계로 분류하고 그 상태를 정의하고 있다(Table 3). 여기서 소파는 지진취약도 함수에서 제공하는 Slight와 Moderate, 반파는 Extensive, 전파는 Complete에 해당한다. 이 3단계를 간단히 정의하면 소파는 주요 구조부 균열의 수리가 필요한 상태, 반파는 주요 구조부가 파손되어 수리하지 않으면 사용할 수 없는 상태, 전파는 주요 구조부가 파손되어 개축하지 않으면 사용할 수 없는 상태다. 반파는 ‘건축법’ 상의 대수선에 준하는 정도의 파손을 의미한다. 행정안전부 요령의 피해 상태 정의는 매우 쉽게 이해할 수 있다. 하지만 건축물의 실제 구조

Table 3. Descriptions for damage levels by Korean government

Ministry of the Interior and Safety		Ministry of Land, Infrastructure and Transport	
Level	Description	Level	Description
Minor	Unable to use without repair due to cracks in main structural members.	C	Minor defect in main structural members, but no safety problem. Simple repair or rehabilitation is necessary to prevent deterioration of durability and functionality
Partial	Unable to use without repair due to damage to main structural members.	D	Imminent repair or rehabilitation and decision of use restriction are necessary due to defects in main structural members.
Complete	Unable to use without rebuilding due to damage to main structural members.	E	Imminent use prohibition, and rehabilitation or rebuilding are necessary due to serious defects in main structural members.

적 피해를 3단계 중 하나로 규정하기는 쉽지 않은 것이 현실이다.

국토교통부에서는 2020년 11월에 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침(이하 지침)’ 일부 개정안[6]을 고시하였다. 이 지침에서는 시설물의 안전 등급을 A~E까지 5단계로 정의하고 있다. A와 B는 안전에 문제가 거의 없는 상태이므로 제외하면 C, D, 및 E의 3가지 등급을 행정안전부 요령의 소파, 반파, 및 전파와 대략 등치 할 수 있다(Table 3). 이들을 간단히 정의하면 C등급은 주요 부재에 경미한 결함이 있으나 간단한 보수·보강이 필요한 상태, D등급은 주요 부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요한 상태, E등급은 주요 부재에 심각한 결함이 발생하여 보강 또는 개축이 필요한 상태다. 해당 시설의 사용 여부를 기준으로 하면 C등급은 사용이 가능한 상태, D등급은 사용 제한을 고려해야 하는 상태, E등급은 사용을 금지해야 하는 상태다.

행정안전부의 요령은 제목으로부터 알 수 있듯이 재난으로 발생한 피해를 조사하고 복구 계획을 수립하기 위해 작성된 것이다. 따라서 피해 정도를 분류해서 보상 수준과 복구 비용을 책정하는 목적이 강하다. 반면 국토교통부의 지침은 평소에도 시설물을 진단하여 진단 결과에 따라 사용 및 보수·보강 여부를 판단하는 유지관리의 목적이 강하다. 물론 국토교통부의 지침은 재난 발생 후 시설물의 안전성 여부를 판단할 때도 매우 유용하다. 구조 전문가들은 국토교통부 지침을 사용하는 데 익숙하다. 반면 시설물의 사용자와 공무원들은 재난 발생 후 행정안전부 요령에 따라 결정된 피해 상태가 매우 중요하다. 결국 구조 전문가와 사용자 및 공무원의 손상상태에 대한 상호 이해가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

2.4 현 지진취약도 함수의 필로티 건물 손상도 기준

현 지진취약도 함수[1]에서는 건물의 손상도 기준을 해당 구조 유형의 역강스펙트럼과 FEMA 356의 중간변형각을 참고하고 있다. FEMA 356의 Table C1-3에는 개별 구조시스템의 유형별로 성능 수준에 따라 손상상태를 정의하고, 각각에 대한 중간변형각이 제시되어 있다. 필로티 건물은

Table 4. Story drift (%) for each damage state of piloti-type buildings

Damage state (Performance level)	Slight (OP)	Moderate (IO)	Extensive (LS)	Complete (CP)
HAZUS [2]*	0.3	0.6	1.6	4.0
FEMA 356 [3]*	-	0.5	1.0	2.0
Fragility function [1]	0.25	0.5	0.8	1.6

*for concrete shear walls

철근콘크리트 전단벽과 모멘트골조가 함께 지진력에 저항하는데 손상상태별 층간변형각은 전단벽이 더 작은 값을 가지므로 현 지진취약도 함수에서는 전단벽의 값을 선택하였다. 더불어 기존 필로티 건물은 내진설계가 거의 적용되지 않아 LS와 CP 성능 수준에서는 FEMA 356이 제시하는 값의 80%를 적용하였다. 또한 FEMA 356에서는 OP 성능 수준에 대한 층간변형각이 제시되어 있지 않아 IO 성능 수준의 1/2을 사용하였다.

현 지진취약도 함수의 필로티 건물에 대한 손상상태별 층간변형각을 콘크리트 전단벽에 대한 HAZUS 및 FEMA 356의 값과 함께 Table 4에 정리하였다. 여기서 주지해야 할 사실은 HAZUS와 FEMA 356에서 제시한 전단벽의 층간변형각들은 휨거동을 한다는 전제가 깔려 있다. 이로 인해 Complete에서 4%와 2%로 상당히 큰 값이 지정되어 있다. 하지만 국내 필로티 건물의 전단벽은 휨거동을 하기에 부족한 수평철근이 배근 되어 있을 뿐만 아니라 기둥도 휨거동을 하기에 부족한 띠철근이 배근 되어 있다[4, 7]. 따라서 FEMA 365의 벽체 층간변형각의 80%를 취하더라도 국내 필로티 건물의 변형 능력에 비해 매우 높은 수준일 수밖에 없다.

3. 필로티 건물의 피해 분류

2017년 포항 지진은 해당 지역의 많은 건물에 구조적인 피해를 줬지만, 그중에서도 저층 철근콘크리트 필로티 건물의 피해가 가장 심각했다. 필로티 건물은 1층에 주차장 설치를 위해 계단실 코어벽체를 제외하면 대부분의 수직하중을 기둥이 저항하는 구조로 되어 있다. 반면 2층 이상은 일반적

으로 원형으로 구성되기 때문에 벽식구조를 가지고 있다. 지진력과 같은 횡력을 저항할 때 1층은 연약층이 될 수밖에 없는 구조이므로 지진에 매우 취약한 구조다. 그런데, 포항 지진 후 필로티 건물 현황 조사에서 대부분 내진 설계도 적용되지 않은 것으로 나타났다[3, 4]. 이로 인해 특히 1층 기둥의 경우 띠철근의 양이 부족할뿐더러 상세가 부실하여 피해가 집중되었으며, 코어 벽체의 경우는 전단철근이 부족하여 전단파괴가 많이 발생하였다.

이러한 손상상태를 HAZUS, FEMA 356, 행정안전부 요령, 국토교통부 지침에서는 3~5단계로 분류하여 보수 및 보강, 피해 예측, 또는 복구 계획 등에 사용하고 있다. 이들은 대체로 균열이 있지만 심각하지 않아 간단한 보수·보강만이 필요한 상태, 심각한 균열이 발생하여 신속한 보수·보강이 필요한 상태, 심각한 균열로 인해 주철근 좌굴과 내부 콘크리트 파괴로 부재를 개축해야 하는 상태로 구분하고 있다. 행정안전부 요령의 분류 방식(소파, 반파, 전파)에 맞춰 포항 지진에서 발생한 필로티 건물의 피해를 정의하고 분류해보았다.







소파는 기둥 또는 벽체에 균열이 발생하여 일부 피복이 탈락하였지만, 철근의 노출은 없는 상태다. 반파는 기둥 또는 벽체에 전단 균열이 뚜렷이 발생하였고 주철근의 노출이 일부 확인되는 상태다. 전파는 기둥 또는 벽체에 내부 콘크리트까지 파괴되는 전단파괴가 명확하게 확인되는 상태다. Table 5에는 각 손상 단계별로 정의와 포항 지진의 피해사례 사진을 함께 정리하였다. 물론 개별 손상 단계 내에서도 균열의 크기나 손상 정도가 약간씩 다르다. 다양한 형태의 손상을 3가지로 구분하는 것은 필연적으로 불확실성을 내포할 수밖에 없다.

4. 필로티 건물의 해석적 거동 분석

4.1 대표 필로티 건물 평면

필로티 건물의 지진에 대한 거동은 계단실 코어의 위치에 크게 영향을 받는다. 코어의 위치는 매우 다양하나 크게 중심코어(central core, CC)와 편심코어(eccentric core, EC)로 구분한다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 중심코어는 평면에서 내부에 위치하고, 편심코어는 평면의 한쪽에 치우쳐 위

Table 5. Damage states of piloti-type buildings in Pohang earthquake

	Minor		Partial		Complete	
	Description	Photo at site	Description	Photo at site	Description	Photo at site
Column	- minor crack - crack in cover concrete		- shear crack or failure - concrete spalling - rebar exposure		- shear crack or failure - main rebar exposure and buckling - core concrete failure	
Wall	- shear crack		- shear crack or failure - concrete spalling - rebar exposure		- X-type shear failure - inner concrete failure - rebar exposure	

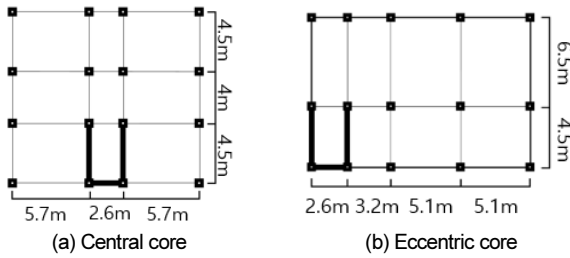


Fig. 1. Plan views of piloti-type buildings

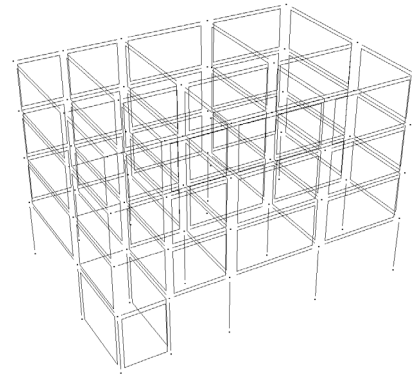


Fig. 2. Analysis model of piloti-type building with eccentric core

Table 6. Structural information for example buildings

Strength of concrete (f_{ck})		21 MPa
Strength of rebar (f_y)		400 MPa
Column	Size	400 mm x 600 mm
	Main bars (reinforcement ratio)	10 - D19 (0.015)
	Stirrup	D10@300 mm
Beam	Thickness	200 mm
	Vertical reinforcement	D10@300 mm
	Horizontal reinforcement	D10@300 mm

치한다. 코어 벽체는 계단실을 따라 설치되므로 한쪽에는 상대적으로 긴 벽체가 쌍으로 위치하고 다른 한쪽에는 짧은 벽체 하나가 위치한다. 일반적으로 전자를 Y 방향, 후자를 X 방향으로 지칭한다. 중심코어 건물(Fig. 1(a))은 Y 방향으로는 대칭이나 X 방향으로는 비대칭이다. 편심코어 건물(Fig. 2(b))은 양방향 모두 비대칭이나 편심 길이는 Y 방향이 더 길다. 따라서 필로티 건물의 지진 거동은 코어 위치 및 방향에 따라 다를 수밖에 없다.

Table 6은 예제 건물의 재료 강도, 부재 치수 및 철근배근 정보를 정리한 것이다. 이들은 국내 필로티 건물에서 일반적으로 사용되는 값으로 정하였다. 기둥 단면 치수는 Y 방향이 X 방향에 비해 좀 더 크다. 기둥 띠철근, 벽체 수평 및 수직철근은 기본 배근(D10@300 mm)을 사용하고 있다. 이로 인해 기둥과 벽체는 휨지배거동 보다는 전단지배거동을 보인다.

4.2 필로티 건물의 비선형 모델링

예제 건물의 비선형모델링을 위한 유효강성, 재료 및 부재 강도, 비선형 능력은 대부분 한국시설안전공단의 “기존 건축물 내진성능 평가 및 향상 요령(이하 공단 요령)[8]”을 따랐다. 비선형해석을 위한 상용 구조해석 프로그램은 Perform-3D(이하 퍼폼)[9]을 사용하였다. 퍼폼으로 모델링 한 사례는 Fig. 2에 있으며, 필로티 건물에서 지진 거동에 가장 큰 영향을 미치는 두 부재, 기둥과 벽체의 비선형 모델링에 대해 간략하게 기술하겠다.

기둥의 비선형거동 모사를 위한 소성힌지는 모멘트힌지와 전단힌지를 함께 사용하였다. 모멘트힌지의 항복모멘트는 단면의 2축 축력-모멘트(P-M2-M3) 상관관계, 전단힌지의 항복전단은 2축 전단(V2-V3) 관계를 입력하였다. 이때 각 축의 전단강도는 공단 요령의 식을 따랐으며, 띠철근의 간격이 부재 깊이의 1/2보다 크기 때문에 띠철근의 전단강도는 $0.5 V_s$ 가 되었다. 하지만 포항 지진에서 필로티 기둥 띠철근의 간격이 넓고 사공이 불량하여 전단에 대한 지지 능력을 기대하기 어려운 경우가 많았기 때문에 띠철근의 역할을 무시하고 기둥의 전단강도는 콘크리트의 전단강도(V_c)만

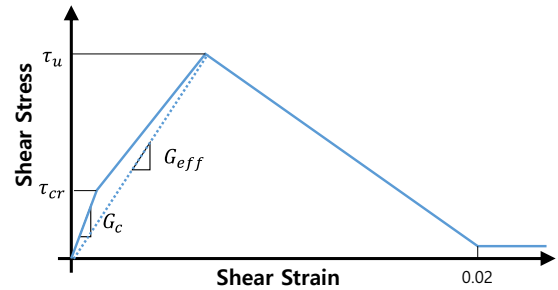


Fig. 3. Nonlinear shear stress vs. strain relationship of walls

을 반영한 예도 함께 고려하였다.

기둥 모멘트힌지의 비선형능력은 기둥의 지배 거동에 관계없이 조건2(휨항복 후 전단파괴)를 적용하였다. 전단힌지의 비선형능력은 없다고 보고 전단강도 도달 후 강도가 감소하도록 하였다. 다만 해석의 안정성을 위해 강도 감소는 다소 천천히 이루어지도록 기울기를 완만하게 입력하였다. 해석 시 실시간으로 기둥에 발생하는 부재력들을 계산하고, 상관관계에 따라 계산한 항복부재력과 비교하여 먼저 항복에 도달하는 쪽이 소성구간에 먼저 들어가서 미리 설정해 놓은 비선형거동을 따르게 된다.

벽체 모델은 퍼폼의 “Shear Wall Element”를 사용하였다. 벽체의 휨거동은 섬유단면(Fiber section)을 사용하여 모델링하였고, 이때 콘크리트와 철근에 대한 재료 비선형속성이 필요하다. 콘크리트의 인장응력은 무시하였고, 압축쪽은 최대 응력이 25.2 MPa, 최대 응력에서 변형률은 0.002, 최대 응력 도달 후 변형률 0.004에서 최소가 되도록 입력하였다. 철근은 인장과 압축을 대칭으로 입력하였으며, 좌굴이 발생하지 않은 것으로 가정하였다. 항복강도는 440 MPa, 항복 후 강성비는 3%로 가정하였다. 최대 응력은 600 MPa이며, 변형률이 0.004일 때 응력이 감소하도록 하였다.

벽체의 전단거동은 삼선형 전단 응력-변형률 관계로 정의하였다(Fig. 3). 삼선형 관계를 정의하는 값들은 다음의 식으로 산정하였다.

$$\tau_u = 0.167 \sqrt{f_{ck}} + \rho f_y \quad (1)$$

$$\tau_{cr} = 0.4 \tau_u \quad (2)$$

$$G_c = 0.43 E_c \quad (3)$$

$$G_{eff} = 0.1 G_c \quad (4)$$

여기서 τ_u 는 최대전단응력, τ_c 은 균열전단응력, G_c 는 포아송비 0.167을 적용한 전단탄성계수, G_{eff} 는 유효전단강성이다. 최대전단응력 도달 후 전단변형률이 0.02까지 서서히 감소하도록 정의하였다. 이는 퍼포 해석의 수렴 여부를 고려하여 결정하였다.

4.3 푸쉬오버해석 결과 분석

필로티 건물의 횡방향 비선형 거동은 코어 벽체의 위치에 크게 영향을 받는다. 필로티 기둥의 배근 상세도 비선형 거동에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 벽체와 기둥을 비교하면 벽체의 강성이 상대적으로 크기 때문에 벽체가 최대 강도에 도달하는 시점이 기둥에 비해 빠르다. 이렇게 볼 수 있는 것에는 기둥이 휨거동을 한다는 전제가 깔려 있다. 하지만 기둥이 전단지배 거동을 하면 휨거동을 하는 기둥에 비해 파괴에 도달하는 시점이 상대적으로 빠르다. 이러한 기둥의 취성 거동은 필로티 건물의 비선형 거동에 큰 영향을 주는 변수이며 아래의 해석 결과에서 확인할 수 있다.

중심 및 편심 코어 건물의 X 및 Y 방향 푸쉬오버 곡선을 기둥 띠철근의 역할을 무시($V_n = V_c$)한 경우(Fig. 4) 및 띠철근의 역할을 그대로 반영($V_n = V_c + 0.5V_s$)한 경우(Fig. 5)로 구분하여 나타내었다. 그림에서 삼각형 표시는 벽체에서, 원형 표시는 기둥에서 중요한 거동이 발생하는 시점을 나타낸다. 일반적으로 벽체가 기둥에 비해 강성이 크기 때문에 푸쉬오버곡선에서 벽체의 균열 및 항복이 기둥에 비해 먼저 발생한다. 하지만 코어벽체의 위치와 기둥의 지배거동에 따라 그 순서는 변화하였다.

먼저 기둥 띠철근의 역할을 무시한 경우를 살펴보겠다. 총 4가지(중심 X & Y, 편심 X & Y) 방향이 있는데 방향별로 특성이 있다. 코어를 중심과 편심으로 나누었지만, 평면 비정형성 가장 작은 경우는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 중심 코어 Y 방향이다. 평면이 코어 벽체를 중심으로 대칭의 형태를 지니고 있기 때문이다. 이때 푸쉬오버곡선의 형태(Fig. 4(b))는 거의 벽체의 비선형 거동 형태(Fig. 3)와 유사하다. 즉, 필로티 건물의 거동이 벽체의 거동에 좌우된다는 것이다. 이에 따라 벽체가 최대강도 도달 후 80% 수준으로 강도가 떨어진 후에 기둥의 전단파괴가 발생한다.

평면 비정형성이 가장 큰 경우는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 편심 코어 Y 방향이다. 코어 벽체가 한쪽 모서리에 위치하고 기둥이 X 방향으로 길게 위치하기 때문이다. 이때는 벽체의 전단균열이 먼저 발생한 후 벽체가 최대강도에 도달하기 전에 기둥에서 전단으로 인한 파괴가 발생한다. 횡방향으로 변형이 증가할 때 모서리의 코어 벽체를 중심으로 상대적으로 강성이 작은 기둥들이 횡변형이 집중되는 것이다. 층간변형각을 기준으로 보면 이때가 가장 낮은 층간변형각 수준에서 기둥의 50%가 전단파괴로 나타난다.

나머지 중심 및 편심 코어 X 방향은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 평면 비정형성에서 중심 코어 Y 방향보다는 작고 편심 코어 X 방향보다는 크다. 그 결과로 푸쉬오버곡선도 앞선 두 경우에 비해 완만한 형태를 보인다. 다만 기둥이 전단파괴에 도달하는 시점이 평면 형태상 중심 코어에서 더 빨랐다. 또한 X 방향은 짧은 벽체가 하나 밖에 있지 않아 밀면전단력이 최대에 도달하기 전에 벽체가 전단강도에 도달하였다. 벽체의 수평철근이 기본 배근으로 되어 있어 전단강도가 작은 것도 원인의 하나다.

이제는 띠철근의 역할을 고려한 경우를 살펴보겠다. 띠철근의 역할을 기둥 전단강도에 포함하면 평면에서 X 방향으로 작용하는 전단에 대해서 기

둥의 지배거동이 전단에서 휨-전단으로 전환되었다. Y 방향은 여전히 전단 지배로 나타났다. 이로 인해 중심 코어 Y 방향은 띠철근 역할을 무시했을 때와 곡선의 형태와 주요 거동 발생 순서 및 시점이 거의 같다. 편심 코어 Y 방향은 기둥이 Y 방향으로 여전히 전단지배임에도 불구하고 주요 거동 발생 시점이 전체적으로 늦춰졌다. 그 이유는 Y 방향으로 푸쉬오버해석을 수행하지만 비틀림으로 인해 X 방향으로도 기둥의 전단이 영향을 받기 때문이다. X 방향 기둥의 전단은 휨항복이 선행하는 것으로 바뀌었다.

중심 및 편심 코어 X 방향은 모두 띠철근 역할을 무시했을 때보다 밀면전단력의 최대값 도달 후 감소 속도가 현저히 감소하였다. 이에 더해 주요 거동 발생에서 벽체의 강도가 최대의 50%로 감소할 때까지 단 하나의 기둥에서도 전단파괴가 발생하지 않았다. 대부분의 주요한 거동은 벽체에서 발생하였으며, 해당 시점의 층간변형각은 띠철근의 역할을 무시했을 때 모든 경우와 고려했을 때 타 방향에 비해 매우 크게 나타났다. 이처럼 기둥에서 항복이 선행하지만 해도 필로티 건물의 비선형 거동이 매우 연성적으로 바뀔 수 있다는 것을 알 수 있다.

마지막으로 푸쉬오버곡선의 형태와 개별 부재의 주요 거동 발생과의 상관관계를 다루고자 한다. Fig. 4와 Fig. 5에서 알 수 있듯이 푸쉬오버곡선에서 벽체 전단항복이나 기둥 전단파괴 등과 같은 주요 거동이 발생하는 위치가 코어위치나 방향에 따라 상당히 다르다. 일단 발생 위치에 해당하는 층간변형각이 다르고, 밀면전단력의 크기 자체뿐만 아니라 최대값에 비해 감소한 밀면전단력의 크기도 다르다. 현 지진취약도 함수에서는 손상상태별 손상도 기준을 푸쉬오버곡선에 기반한 역량곡선[10]의 형태와 층간변형각으로부터 결정하므로 이러한 편차는 필로티 건물의 단일한 역량곡선과 손상도 기준을 설정하는 데 장애물로 작용할 수 있다.

5. 필로티 건물의 손상도 기준 정의

3장에서 필로티 건물의 손상상태를 소파, 반파, 전파의 3단계로 분류하고 그 상태를 정의하였다. 4단계 분류로는 소파는 Slight와 Moderate, 반파는 Extensive, 전파는 Complete에 해당한다. 소파는 기둥과 벽체에서 전단균열이 발생하는 손상상태다. 해석모델에서 벽체의 전단균열 시점은 기둥에 비해 상대적으로 명확히 모사할 수 있다. Fig. 3에서와 같이 벽체의 비선형 전단거동을 3선형으로 정의했고 첫 번째 강성이 변화하는 시점이 벽체 전단균열이기 때문이다. 반면 기둥은 해석모델에서 전단균열 시점을 명확히 모사하기 어렵다. 더욱이 Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 변형이 작을 때는 벽체의 거동이 주로 전체 거동을 좌우한다. 따라서 소파에 해당하는 Slight와 Moderate는 벽체의 거동으로만 정의하였다. 그런데 벽체의 전단균열은 Fig. 4와 Fig. 5에서 알 수 있듯이 매우 작은 변형위에서 나타나 초과확률을 과도하게 평가할 수 있다. 전단강도에 도달했을 때는 전단균열이 더욱 뚜렷하게 발생하므로 소파에 해당한다고 보기 힘들다. 따라서 벽체 전단균열강도와 전단강도 시점 사이의 1/4 지점을 Slight, 3/4 지점을 Moderate로 선택하였다.

반파, 즉 Extensive 수준은 기둥과 벽체에서 전단 파괴가 발생하여 균열이 뚜렷히 확인되는 상태다. 벽체의 경우 전단강도에 도달하는 시점을 반파로 정하면 너무 조기에 반파로 결정되므로 전단강도 도달 후 80% 수준으로 강도가 떨어지는 시점을 반파로 선택하였다. 기둥은 필로티 건물에서 일반

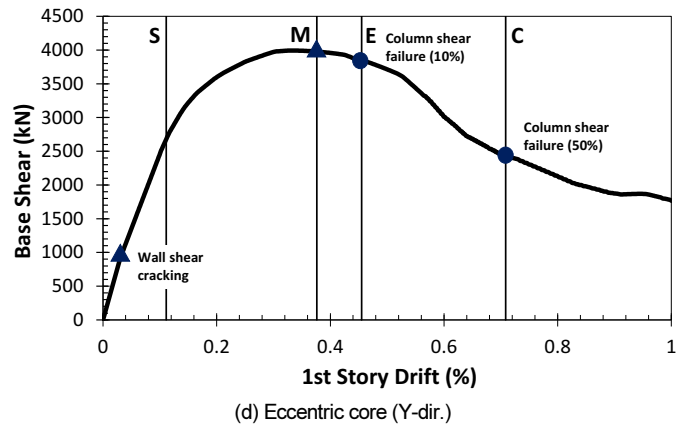
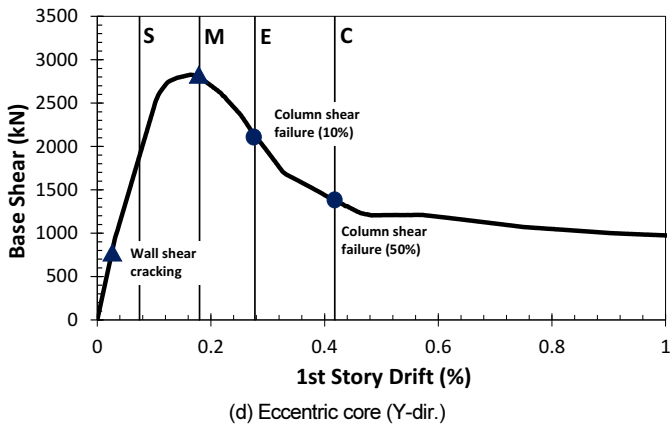
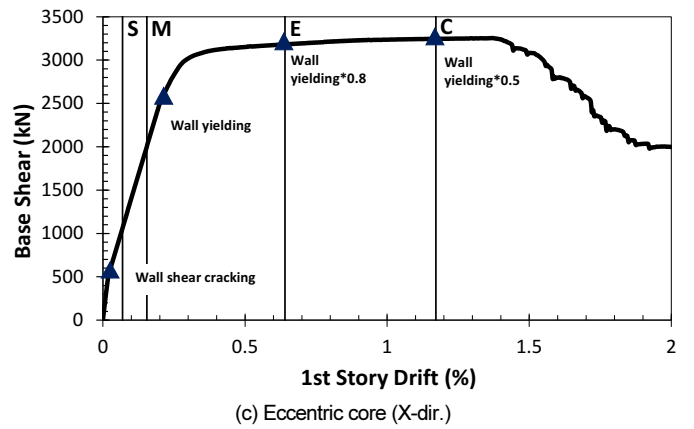
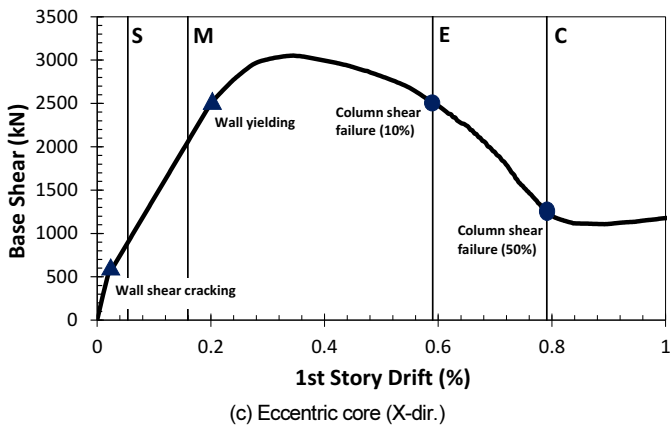
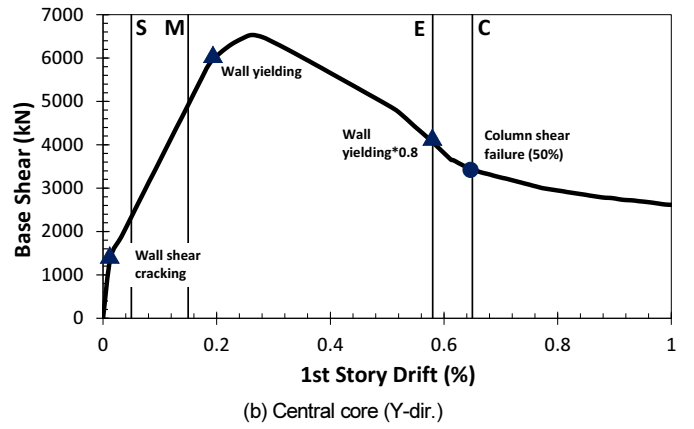
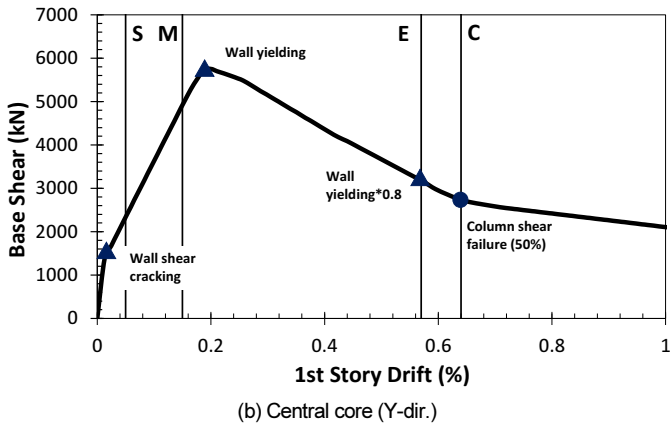
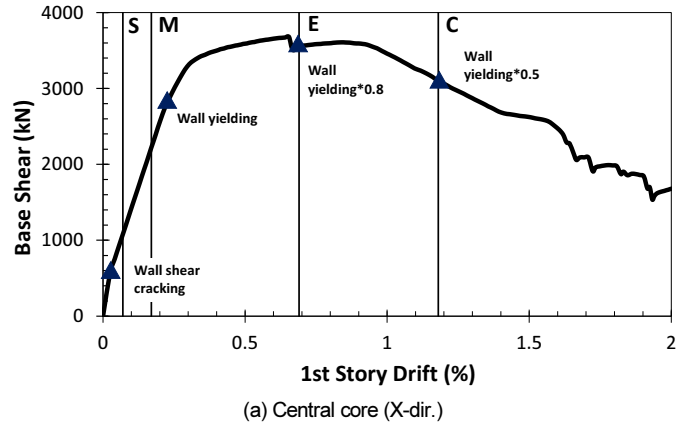
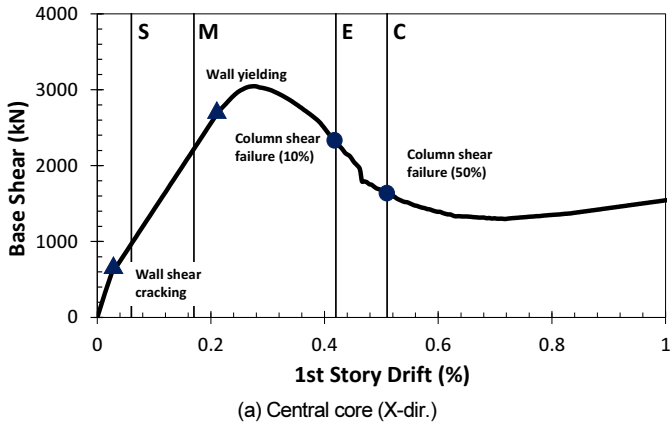


Fig. 4. Pushover curves of sample buildings (Col. $V_n = V_c$)

Fig. 5. Pushover curves of sample buildings (Col. $V_n = V_c + 0.5V_s$)

Table 7. Damage state definition for piloti-type buildings by pushover analysis (Column $V_n = V_c$)

Level	Damage state	Central core				Eccentric core			
		X-dir.		Y-dir.		X-dir.		Y-dir.	
		Column	Wall	Column	Wall	Column	Wall	Column	Wall
Minor	Slight (S)	-	1/4 (cracking, yielding)	-	1/4 (cracking, yielding)	-	1/4 (cracking, yielding)	-	1/4 (cracking, yielding)
	Moderate (M)	-	3/4 (cracking, yielding)	-	3/4 (cracking, yielding)	-	3/4 (cracking, yielding)	**	**
Partial	Extensive (E)	10%*	-	-	0.8*yielding	10%	-	10%	-
Complete	Complete (C)	50%*	-	50%	-	50%	-	50%	-

* Number of shear failure columns/Total column number, ** Capping point at pushover curve

Table 8. Damage state definition for piloti-type buildings by pushover analysis (Column $V_n = V_c + 0.5 V_s$)

Level	Damage state	Central core				Eccentric core			
		X-dir.		Y-dir.		X-dir.		Y-dir.	
		Column	Wall	Column	Wall	Column	Wall	Column	Wall
Minor	Slight (S)	-	1/4 (cracking, yielding)	-	1/4 (cracking, yielding)	-	1/4 (cracking, yielding)	-	1/4 (cracking, yielding)
	Moderate (M)	-	3/4 (cracking, yielding)	-	3/4 (cracking, yielding)	-	3/4 (cracking, yielding)	-	3/4 (cracking, yielding)
Partial	Extensive (E)	-	0.8*yielding	-	0.8*yielding	-	0.8*yielding	10%	-
Complete	Complete (C)	-	0.5*yielding	50%*	-	-	0.5*yielding	50%	-

* Number of shear failure columns/Total column number

Table 9. Story drift (%) for each damage state by pushover analysis (column shear: $V_n = V_c$)

Damage state		Slight	Moderate	Extensive	Complete
Central core	X-dir.	0.06	0.17	0.42	0.51
	Y-dir.	0.05	0.15	0.57	0.64
Eccentric core	X-dir.	0.05	0.16	0.59	0.79
	Y-dir.	0.11	0.18	0.28	0.42
Average		0.07	0.17	0.47	0.59

적으로 10개 내외로 구성되어 있어 그중 하나의 기둥(1/10)에서 전단파괴가 발생하는 시점을 반파로 선택하였다. 전파, 즉 Complete 수준은 기둥과 벽체 모두 완전히 전단으로 파괴되어 기둥에서는 코어 콘크리트 파괴와 주철근 좌굴, 벽체에서는 주철근 노출 또는 천공이 발생하는 상태다. 하지만 이러한 거동을 해석 모델에서 정확히 모사하기는 쉽지 않다. 따라서 간접적으로 벽체가 전단강도의 50% 수준에 도달할 때 또는 기둥의 50%가 전단으로 파괴될 때를 전파로 선택하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 4단계 손상상태가 발생하는 시점을 모두 표시하였다. 손상상태 발생 순서와 위치(기둥 또는 벽체)를 기둥 전단강도 산정에서 피철근 역할 반영 여부에 따라 Table 7과 Table 8에 각각 정리하였다.

위와 같이 정의한 손상상태를 현 지진취약도 함수와 비교해보기 위해 먼저 각각의 손상상태 발생 시점에서의 층간변형각을 Table 9와 Table 10에 정리하였다. 그런데 현 지진취약도 함수에서는 Table 4와 같이 손상상태별로 정의한 층간변형각을 스펙트럼 변위로 변환하여 손상도 기준으로 사용하고 있다. 층간변형각을 스펙트럼 변위로 변환하는 방법은 HAZUS를 따르고 있으며, 그 수식은 다음과 같다.

Table 10. Story drift (%) for each damage state by pushover analysis (column shear: $V_n = V_c + 0.5 V_s$)

Damage state		Slight	Moderate	Extensive	Complete
Central core	X-dir.	0.07	0.17	0.69	1.18
	Y-dir.	0.05	0.15	0.58	0.65
Eccentric core	X-dir.	0.07	0.15	0.64	1.17
	Y-dir.	0.04	0.38	0.45	0.71
Average		0.06	0.21	0.59	0.93

$$S_{d,ds} = \Delta_{ds} \cdot H_R \cdot \alpha_2 \tag{5}$$

여기서, $S_{d,ds}$ = 손상상태에서의 스펙트럼 변위

Δ_{ds} = 손상상태에서의 층간변형각

H_R = 대상 건물의 지붕층 높이

α_2 = ATC-40[10]에 따른 푸쉬오버 모드 계수

현 지진취약도 함수에서 각 손상상태에서 필로티 건물의 층간변형각 Δ_{ds} 는 Table 4의 마지막 행에 제시되어 있다. 필로티 건물의 지붕층 높이 H_R 은 4층을 기준으로 13.7 m로 가정하였으며, α_2 는 0.785를 사용하였다. 결과적으로 현 지진취약도 함수에서 필로티 건물의 손상상태별 스펙트럼 변위는 Slight부터 Complete까지 26.9 mm, 53.8 mm, 86.2 mm, 172 mm 다. 그런데 필로티 건물은 대부분의 비선형거동이 1층에서 발생한다. 푸쉬 오버해석에서 확인한 결과 1층 바닥과 지붕층 변위는 큰 차이가 없었다. 따라서 지붕층 층간변형각은 필로티 건물의 실제 비선형거동 또는 피해

수준을 정확하게 나타내지 못한다. 이를 고려하면 현 지진취약도 함수의 손상도 기준을 1/3로 축소해야 필로티 건물의 실제 거동을 반영할 수 있다고 본다.

Table 9와 Table 10에 제시된 층간변형각을 개별적으로 스펙트럼 변위로 변환하여 각각 평균한 값을 Table 11에 정리하였다. 이들은 1층 층간변형각이므로 식 (5)에 지붕층 높이가 아니라 1층 높이 3.3 m를 적용하였다. α_2 는 코어 위치 및 방향별로 모두 다른 값을 적용하였다. 이들과 함께 현 지진취약도 함수의 손상도 기준과 1/3로 감소시킨 값도 정리하였다. 앞서 기술한 이유로 현 지진취약도 함수의 손상도 기준은 필로티 건물의 취성적 거동을 반영한 해석 모델에 근거한 값에 비해 매우 크다. 현 손상도 기준을 1/3로 감소시킨 값도 여전히 해석 모델에 의한 값보다 크다. 그다음은 기동 전단강도 산정 시 띠철근의 역할을 반영한 모델의 손상도 기준으로서 세 번째로 크며, 띠철근의 역할을 무시했을 때가 가장 작았다. 결론적으로 해석 모

델로 산정한 손상도 기준은 현 지진취약도 함수에 비해 매우 작다.

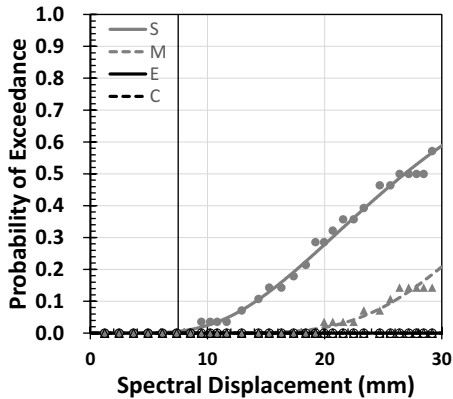
6. 손상도 기준에 따른 지진취약도 비교

현 지진취약도 함수의 필로티 건물에 대한 역량곡선에 다양한 손상도 기준을 적용하여 지진취약도 함수를 새로이 산정해 보았다. 적용한 손상도 기준은 Table 11에 제시된 값이며, 1) 현 지진취약도 함수, 2) 현 지진취약도 함수의 1/3, 3) 기동 전단강도 산정에 콘크리트와 띠철근을 함께 반영했을 때, 4) 기동 전단강도 산정에 콘크리트만 반영했을 때로 총 4가지를 사용하였다. 즉, 역량곡선은 같지만 손상상태별 손상도 기준은 달리 적용한 것이다. 이처럼 다양한 손상도 기준을 적용하여 산정한 취약도 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 취약도 곡선을 분석하기 전에 Fig. 6의 결과는 지진파에 의한 변동성만을 반영한 것임을 주지한다. 취약도 곡선은 중간값과 표준 편차의 함수로 구성되는데, 표준 편차는 지진파 변동성뿐만 아니라 재료 강도, 역량 곡선 등 다양한 변수의 변동성을 반영해야 한다. 하지만 여기서는 손상도 기준에 의한 취약도의 차이를 확인하는 것으로 한정하여 추가적인 변동성을 고려하지 않았다.

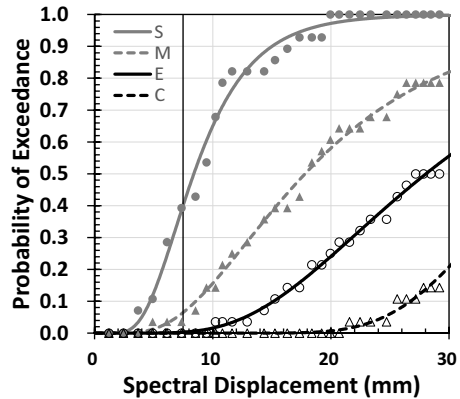
Fig. 6(a)에서 Fig. 6(d)로 갈수록 손상상태별 손상도 기준의 스펙트럼 변위 값은 점점 감소하고 있으므로 같은 스펙트럼 변위에서 초과확률은 점점 증가하고 있음을 알 수 있다. 좀 더 상세하게 보면 현 지진취약도 함수와 해석모델로부터 산정한 손상도 기준의 차이를 알 수 있다. 현 지진취약도 함

Table 11. Spectral displacement (mm) of each damage state by different bases

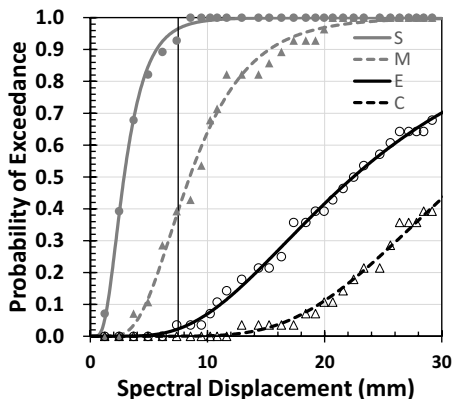
Story drift	Slight	Moderate	Extensive	Complete
Current	26.9	53.8	86.2	172.0
1/3 of current	9.0	17.9	28.7	57.3
$V_n = V_c + 0.5 V_s$	3.13	9.18	22.29	35.19
$V_n = V_c$	2.41	7.88	18.93	22.03



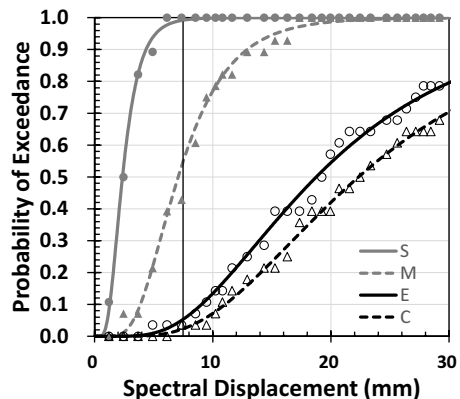
(a) Story drift of damage states in current fragility function



(b) 1/3 Story drift of damage states in current fragility function



(c) Average story drift of damage states for column shear $V_n = V_c + 0.5 V_s$



(d) Average story drift of damage states for column shear $V_n = V_c$

Fig. 6. Fragility curves for different story drifts of damage states

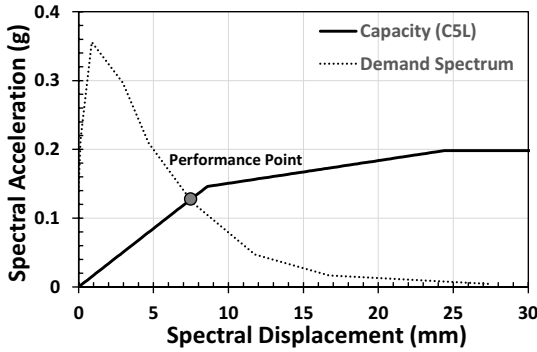


Fig. 7. Capacity curve and demand spectrum at Jangsung-dong

Table 12. Probability of exceedance (%) of each damage state at 7.5 mm of spectral displacement

	Slight	Moderate	Extensive	Complete
Current	0.1	0.0	0.0	0.0
1/3 of current	40.1	6.5	0.3	0.0
$V_n = V_c + 0.5 V_s$	91.9	22.6	0.8	0.0
$V_n = V_c$	99.2	54.9	5.3	2.3

수의 손상도 기준은 손상상태 간에 일정한 간격으로 분포하고 있어 그 결과 인 취약도 곡선도 서로 일정한 간격으로 분포하고 있다(Fig. 6(b)). 반면 예제 건물에 의한 손상도 기준은 Slight와 Moderate, Extensive와 Complete가 각각 서로 가까워서 취약도 곡선도 유사한 경향을 보인다(Fig. 6(c) & Fig. 6(d)). 이러한 현상은 Table 7과 Table 7에서 확인할 수 있듯이 손상상태의 판정이 Slight와 Moderate는 벽체의 거동에 Extensive와 Complete는 기둥의 거동에 주로 좌우된 것이 원인이다. 특히 기둥은 취성적인 전단지배 거동으로 Extensive와 Complete의 손상도 기준을 현 취약도 함수보다 더 작은 값으로 이끌었고, 두 손상상태의 발생 간격도 크지 않게 만들었다. 이는 기둥 전단강도에서 띠철근의 역할을 무시하여 기둥의 전단지배 거동이 가장 뚜렷하게 나타나도록 한 Fig. 6(d)에서 Extensive와 Complete의 취약도 곡선이 가장 가까이 위치한 것에서도 알 수 있다.

손상도 기준에 의한 초과확률의 차이를 분석하기 위해 2017년 포항 지진 당시 포항시 북구 장성동 일대의 스펙트럼 가속도를 기상청 감쇠식을 바탕으로 추정하였다. 이를 현 취약도 함수의 필로티 건물 역량곡선에 적용하여 성능점을 구하였다(Fig. 7). 성능점에서 스펙트럼 변위는 7.5 mm며, 이때 손상도 기준에 따라 초과확률을 구한 결과를 Table 12에 정리하였다. 현 지진취약도 함수의 손상도 기준에 의하면 포항 지진에서 장성동 일대의 필로티 건물에서는 손상이 거의 발생하지 않는다. 이는 특별한 자료를 제시하지 않더라도 포항 지진 피해 결과와 맞지 않다는 것을 알 수 있다. 이를 1/3로 줄이더라도 반파 및 전파에 해당하는 Extensive와 Complete의 초과확률이 매우 작다. 소파에 해당하는 Slight와 Moderate는 보는 기준에 따라 차이가 있겠지만 적절한 수준으로 볼 수 있다. 이러한 결과의 원인은 필로티 건물의 낮은 설계 및 시공 품질을 고려하지 않았기 때문이다.

반면 해석 모델에 의한 초과확률은 기둥의 능력을 가장 낮게 보았을 때 전파가 2%를 초과하였다. 다양한 변동성을 모두 고려한다면 더 큰 값을 나타낼 것이다. 포항 지진에서 필로티 건물의 피해가 컸지만, 전파가 이 정도면 실제보다 상당히 높은 수준이다. 따라서 기둥 전단강도에서 띠철근의 역

할을 완전히 무시하면 전파 확률이 실제보다 높게 나타날 수 있다. 소파에 해당하는 Slight와 Moderate의 초과확률은 90%를 초과하여 매우 높게 나타났다. 이는 대부분의 필로티 건물에서 소규모의 손상이 발생했다는 것인데, 이 또한 과도한 것으로 보인다. 따라서 해석 모델에 의해 소파를 정의할 때는 Slight는 제외하고 벽체가 항복하기 이전의 손상도 기준을 적용한 Moderate만 포함하는 것이 바람직한 것으로 보인다.

7. 결론

현 지진취약도 함수에서 저층 필로티 건물의 손상상태별 손상도 기준은 2017년 포항 지진에서 확인된 취성적 거동 형태를 반영하지 못하고 있으며, 실제 능력보다 더 크게 책정되어 있다. 이에 따라 현 지진취약도 함수는 저층 필로티 건물의 피해 확률을 실제보다 낮게 산출할 수밖에 없는 현실이다. 이를 개선하고자 포항 지진 피해 결과를 푸시오버해석을 위한 모델과 손상도 기준 책정에 반영하였다. 특히 기둥 띠철근의 전단강도에 대한 기여 여부도 해석 모델에 반영하여 그 영향을 확인하였다.

저층 필로티 건물의 취성적 거동을 반영했을 때 현 지진취약도 함수의 손상도 기준을 손상상태별로 1/4~1/6 정도로 감소해야 한다. 이 정도 수준이면 포항 지진에서 발생한 필로티 건물의 피해 확률과 대략 유사한 값을 산출한다. 다만 기둥 띠철근의 기여는 완전 무시와 100% 반영 사이의 어느 지점에 해당하는 것으로 보인다. 소파의 경우 Moderate에 해당하는 손상도 기준을 단일 기준으로 선택하여 피해 확률을 산정하는 것이 필요해 보인다.

현 지진취약도 함수는 구조유형별로 단일 역량 곡선을 사용하고 취약도를 스펙트럼 변위의 함수로 정의하고 있다. 그런데 저층 필로티 건물은 코어 위치 및 방향에 따라 역량 곡선의 강도뿐만 아니라 변형 능력도 다르므로 이 방법은 저층 필로티 건물의 지진취약도를 정확히 산정하는 데 한계가 있다고 판단된다. 따라서 저층 필로티 건물에는 부재 거동을 기반으로 한 손상도 기준을 사용하고 3차원 비선형동적해석을 사용하는 증분동적해석[11]을 통해 스펙트럼 가속도의 함수로 지진취약도를 산정해서 현재 방법의 결과와 비교해볼 필요가 있다고 생각한다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 행정안전부 극한재난대응 기반기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-MOIS31-013)

/ REFERENCES /

1. National Emergency Management Agency. Development of fragility function of domestic building structures. c2009.
2. Federal Emergency Management Agency. Hazus®-MH 2.1, Advanced engineering building module. Available from: <http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus>
3. Federal Emergency Management Agency. FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. c2000.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. A study on establishment of earthquake disaster prevention measures for piloti-type

- buildings, etc. c2018.
5. Ministry of the Interior and Safety. Establishment outlines of the damage investigation and recovery plan for natural disaster. c2019.
 6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Guidelines on the safety control and maintenance implementation, etc. of establishments, c2020.
 7. Seoul Metropolitan Government. Investigation of seismic performance of piloti-type buildings, etc. vulnerable to earthquake. c2019.
 8. Korea Authority of Land and Infrastructure Safety. Seismic performance evaluation and rehabilitation guidelines of existing buildings. c2019.
 9. Computers and Structures, Inc. Perform-3D, Ver. 6.0.
 10. Applied Technology Council, ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. c1996.
 11. Vamvatsikos D, Cornell CA, Incremental dynamic analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002;31(3):491-514.