

시공기간을 고려한 주거용 철근콘크리트 건물의 시공 중 지진하중 영향 분석

최 성 현¹ · 김 재 요^{2†}

¹광운대학교 건축공학과 석사과정, ²광운대학교 건축공학과 교수

Effect of Seismic Load on Residential RC Buildings under Construction Considering Construction Period

Seong-Hyeon Choi¹ and Jea-Yo Kim^{2†}

¹Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01890, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01890, Korea

Abstract

Compared with buildings that have already been constructed, buildings under construction may be more vulnerable to such natural disasters as earthquakes because the concrete strength is not yet sufficient. Currently, Korean design standards present minimum performance targets for each seismic grade of buildings, but the seismic load for design is based on a return period of 2400 years. However, because the construction period of the building is much shorter than the period of use of the building, the application of the earthquake return period of 2400 years to buildings under construction may be excessive. Therefore, in this study, a construction stage model of buildings with 5, 15, 25, and 60 floors was created to analyze earthquake loads during construction of residential reinforced concrete (RC) buildings. The structural stability was confirmed by applying reduced seismic loads according to the return period. As a result, the structural stability was checked for an earthquake of the return period selected according to the construction period, and the earthquake return period that can secure structural safety according to the size of the building was confirmed.

Keywords : reinforced concrete, structural performances during construction, residential building, seismic load, construction period

1. 서론

대부분의 건축물은 지진이나 바람, 기온 등의 외부 요인에 노출되어 있으며, 시공 중인 건물은 더 취약한 모습을 보이고 있다. 그 동안 고성 엑스포장 붕괴(2015), 제주 수련원 붕괴(2017), 광주 아파트 붕괴(2022) 등 구조물의 시공 중 붕괴사고들이 다수 발생하였다. 시공 중 붕괴는 콘크리트 강도 미발현으로 인한 강도부족, 가설 구조물의 붕괴 등 다양한 원인이 있지만 시공 중 가장 크고 광범위한 피해를 입을 수 있는 지진에 대한 연구는 부족한 실정이다. 물론 시공 중인 건축물에 대한 지진의 피해가 보고된 사례는 없지만, 지진에 의한 치명적인 피해가 발생할 수 있으므로 낮은 발생가능성이라고 할지라도

검토가 필요하다. 특히 국내 건축구조기준에서는 시공 중 지진하중이 명확하게 제시되어 있지 않으므로 시공 중 지진하중의 영향에 대한 연구가 요구된다.

건물은 단면의 형상에 따라 다르지만 일반적으로 높이가 증가할수록 고유주기는 길어진다. 특히 매 층의 평면형태가 일정한 주거용 건축물은 시공이 진행됨에 따라 건축물의 높이가 증가하고 마감이 완료되어 가면서 고유주기에 변화가 생긴다. 지진하중은 고유주기에 의한 영향이 크기 때문에 시공 중에 지진이 발생할 경우 완공된 건축물보다 더 큰 지진하중이 작용할 수 있으며 구조적 성능이 완전히 발현되지 않아 큰 피해가 일어날 가능성이 있다. 따라서, 시공단계에 지진하중을 고려하여 안전성을 확보하기 위해서는 다양한 형태의 건축물을 선정

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-940-5637; E-mail: kimjyo@kw.ac.kr

Received July 8 2022; Revised July 18 2022;

Accepted July 19 2022

© 2022 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.

Table 1 Seismic load by construction period

Building Height	Assumed Construction period	Seismic Load		
		Return Period (T)	Time Period of Interest(n)	Probability (R̄)
5F	~1year	50-years	1	2%
15F	1~2year	100-years	2	1.99%
25F	2~4years	200-years	4	1.985%
60F	4years~	500-years	10	1.982%

하여 시공 중 구조적 성능을 분석하여 검토할 필요가 있다.

이전연구(Hwang and Kim, 2015; Ko and Kim, 2019)에서는 60층 규모의 초고층 주상복합 건물과 25층 규모의 주거형 건물에 시공조건을 고려하여 국내구조기준 및 ASCE 37-14에 제시된 조건을 적절히 반영하여 적용하고 풍하중과 지진하중에 대하여 구조 성능을 분석하였다. 60층 규모의 건물의 부재 단면설계를 검토한 결과, 시공 중 골조완성도가 높아짐에 따라 시공 중의 설계강도비가 증가함을 알 수 있었지만 시공 중의 부재가 설계단계의 부재의 설계강도비를 초과하는 경우는 없었다(Hwang and Kim, 2015). 25층 규모의 건물은 벽체 일부에서 시공 중의 부재가 설계단계의 부재의 설계강도비를 초과하는 경우가 확인되었으며 층간 변위비도 설계단계를 초과하는 시공단계가 존재하는 것으로 확인되었다(Ko and Kim, 2019).

시공 중인 건물에서의 지진하중 영향을 보다 상세히 분석하기 위하여 25층 규모의 주거형 건물을 대상으로 지진재현주기에 따라 지진하중의 영향을 분석하였다(Choi and Kim, 2022). 15층 시공단계모델에서 설계단계 보다 설계강도비가 증가한 부재의 비율과 설계강도비 1.0을 넘는 부재의 비율이 가장 높았고, 재현주기 500년의 지진하중으로 저감시켰을 때 구조적 안전성을 확보할 수 있었다. 하지만 25층 규모의 건축물에 대해서만 분석을 실시하였으며, 재현주기 500년의 지진하중은 단지 구조성능을 만족하는 지진하중일 뿐이므로 적절한 지진하중이라고 판단하기는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 규모의 건축물에 대해 가정한 시공기간에 해당하는 지진재현주기를 선정하고 구조안전성 검토를 통해 시공기간에 따라 적절한 재현주기의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 해석조건

2.1 지진재현주기선정

현재 국내 기준은 내진등급 I등급인 건축물에 대하여 재현주기 2,400년 지진에 대해서는 붕괴방지, 재현주기 1,400년 지진에 대해서는 인명보호의 성능 수준을 제시하고 있다. 이는 최대고려지진(MCE, Maximum Considered Earthquake)개념

Table 2 Design spectrum acceleration by return period

	2,400-year	500-year	200-year	100-year	50-year
S_{DS}	0.454 (100%)	0.255 (56%)	0.184 (41%)	0.142 (31%)	0.1 (22%)
S_{DI}	0.191 (100%)	0.102 (54%)	0.074 (39%)	0.057 (30%)	0.04 (21%)

에 따라 약 2,400년에 한번 발생할 것으로 예측되는 지진을 참고하여 작성된 기준이다. 2,400년 재현주기는 확률론적으로 50년 동안 최대지진발생확률이 2%이므로, 일반적으로 공사기간이 5년 미만인 건축물의 시공과정에 대하여 재현주기 2,400년 수준의 지진을 적용하는 것은 과도하다고 할 수 있다. 따라서 합리적인 재현주기를 통해 건물의 성능을 평가하는 것이 필요하다. Cornell(1968)은 지진원, 전파경로 등 다양한 변수에 의해 지진발생확률 계산식을 제시하였지만 본 논문에서는 동일한 위치와 지반상태를 가정하고, 구조물의 예상 수명 동안 적어도 한 번의 지진발생이 설계 한계를 초과할 확률을 계산하기 위하여 위험분석방정식(Mays, 2010)에 따라 시공기간을 가정하여 시공기간에 따른 지진재현주기를 산정하였다. 식 (1)은 포아송 분포의 확률 질량 함수를 참고하여 작성된 위험분석방정식이다.

$$\bar{R} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (1)$$

\bar{R} 은 예상기간동안 고려한 재현주기의 지진을 초과하는 지진이 발생할 확률을 뜻하며, T 는 재현주기, n 은 예상기간을 뜻한다. 시공 중인 건물의 재현주기를 산정하기 때문에 예상기간에는 시공기간을 입력하였다. Table 1은 시공기간에 따른 지진재현주기를 나타낸 표이다. 국내 기준 Korean Design Standard (2019b)에서 설계를 위한 지진하중은 재현주기 2,400년의 지진위험도를 기반으로 하기 때문에 재현주기 2,400년의 지진이 50년 동안 최대지진발생확률 2%를 기준으로 하여 지진재현주기를 선정하였다. 건물 규모의 따른 시공 기간은 5층 규모는 1년 미만, 15층 규모는 1년 이상~2년 미만, 25층 규모는 2년 이상~4년 이하, 60층 규모는 4년 이상으로 가정하였으며, 식 (1)의 발생 확률 산정을 위한 예상기간(n)은 각각 1년, 2년, 4년, 10년으로 설정하였다.

Table 2는 지진재현주기에 따라 단주기 및 1초 주기의 설계스펙트럼 가속도 S_{DS} , S_{DI} 를 나타낸 표이다. 모든 예제 모델은 국가지진위험지도에서 제시된 유효지반가속도와 서울에 해당하는 지진구역1의 지진구역계수 0.11과 각 재현주기의 위험도 계수를 곱한 값의 80%에 해당하는 값을 비교하여 더 큰 값을 적용하였다. 지반 분류는 S3으로 동일하게 적용하였으며

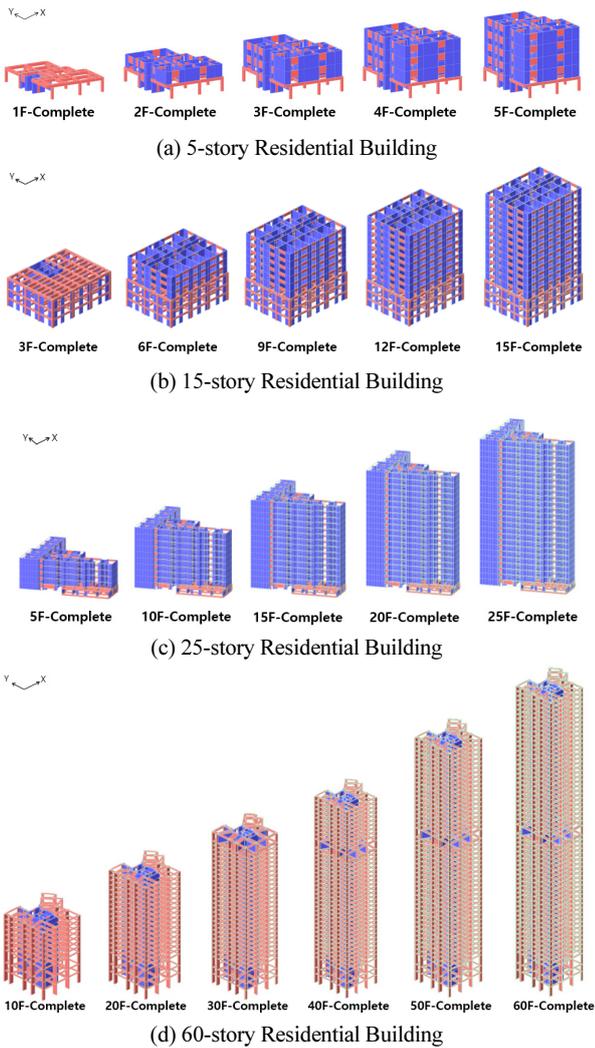


Fig. 1 Construction stage model

건물의 규모의 따라 가정한 지진재현주기는 현재 사용되고 있는 2,400년 재현주기의 0.56, 0.41, 0.31, 0.22배로 감소한 것을 알 수 있다.

2.2 예제모델 및 시공조건

이 연구에 사용된 예제모델은 5층, 15층, 25층, 60층 규모의 철근콘크리트 주거용 건물이다(Fig. 1). 이는 주로 각각 빌라, 오피스텔, 아파트, 주상복합으로 이용되는 규모이다. 5층과 15층 규모의 건물은 필로티 구조로 이루어져 있으며 25층 규모의 건물은 내력벽 구조, 60층 규모의 건물은 30층에 아웃리거 벽체가 적용되었다. 건물의 높이는 5층 규모의 건물은 14.4m, 15층 규모의 건물은 44m, 25층 규모의 건물은 70m, 60층 규모의 건물은 186.16m이며 예제 모델은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS-GEN(MIDAS, 2022)을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 5층 시공단계 해석모델은 1개층 골조 공사의 시공 소

Table 3 Concrete strength in example models

Building Height	f_{ck} (MPa)	Member
5F	24	Column, Beam, Wall
15F	24	Column, Beam, Wall
25F	21	Column, Beam, Wall
60F	21	Effective Beam
	30	Column, Beam, Wall of 30~60F
	40	Column, Beam, Wall of 21~30F
	50	Column, Beam, Wall of 11~20F
	60	Column, Beam, Wall of 1~10F and Outrigger Wall

요기간을 10일로 가정하여 1층, 2층, 3층, 4층, 5층 시공단계 모델들로 구성되었으며 15층 시공단계 해석모델은 1개층 골조 공사의 시공 소요기간을 7일로 가정하여 3층, 6층, 9층, 12층, 15층 모델들로 구성되었고 25층, 60층 시공단계 해석모델은 1개층 골조 공사의 시공 소요기간을 5일로 가정하여 25층 모델은 5층, 10층, 15층, 20층, 25층으로 60층 모델은 10층, 20층, 30층, 40층, 50층, 60층으로 해석모델들을 구성하였다(Fig. 1).

Table 3은 적용한 콘크리트의 설계강도와 해당하는 부재를 나타낸 표이다. 각 시공단계 해석모델들은 콘크리트 강도가 완전히 발현되는 28일을 기준으로 5층 시공단계 해석모델은 상층부 2개 층, 15층 시공단계 해석모델은 상층부 3개 층 그리고 25층과 60층 시공단계 해석모델은 상층부 5개 층을 시공 중인 것으로 가정하였고 마감공사는 골조 시공 후 28일이 지난 시점에 시공하는 것으로 가정하였다. 골조 공사가 완료된 층은 재령 28일에 해당하는 압축강도와 탄성계수를 적용하였으며, 시공단계 모델의 시공 중인 상부 층에는 재령 일에 따라 해당하는 콘크리트의 압축강도와 탄성계수는 국내구조기준(Korean Design Standard, 2021)에 따라 적용하였다. 식 (2)는 Korean Design Standard(2021)에서 제시한 28일 평균 압축강도를 산정하기 위한 식이며, 재령 일에 따른 콘크리트의 강도는 Korean Design Standard(2022)에서 제시된 시간에 따른 강도발현식을 적용하였고(식 (3), (4)) 재령 일에 따른 탄성계수는 보통중량골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수식을 적용하였다(식 (5)). 또한 모든 콘크리트강도는 1종 시멘트 습윤 양생을 기준으로 적용하였다.

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \tag{2}$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{\alpha}(t) f_{cm} \tag{3}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[0.35 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] \quad (4)$$

$$E_c(t) = 8,500 \sqrt[3]{f_{cm}(t)} \quad (5)$$

여기서, f_{cm} 은 28일 평균 압축강도이며, Δf 는 f_{ck} 가 40MPa 이하 일 때 4MPa, 60MPa 이상일 때 6MPa이고, 그 사이는 직선보간으로 구한다. $\beta_{cc}(t)$ 는 시간에 따른 강도발현속도이며, $E_c(t)$ 는 시간에 따른 탄성계수이다. 시공단계와 설계단계 해석을 위하여 시공단계의 구조거동 검토 시에는 28일 평균압축강도인 f_{cm} 을 사용하였으며, 단면설계 검토 시에는 설계압축강도인 f_{ck} 를 사용하였다.

각 모델의 모든 하중조합은 기존연구(Choi and Kim, 2022)와 동일하게 국내 건축구조기준 Korean Design Standard (2019a)을 기반으로 적용하였으며, 시공단계모델의 시공 중 최소설계하중은 ASCE 37-14(American Society of Civil Engineers, 2014)에서 제시하는 조건을 사용하였다.

3. 해석결과

3.1 시공 중 지진하중

Table 4는 예제모델들의 설계단계모델과 시공단계모델의 고유치 해석결과를 나타낸 표이다. 1~3차 모드의 고유 주기와 방향 그리고 질량참여율을 나타내었으며, 모든 설계단계 모델과 시공단계 모델은 동적해석법인 응답스펙트럼해석법으로 진행되었다. Fig. 2는 X축과 Y축 방향에 대해서 5층, 15층, 25층, 60층 규모의 시공단계 모델과 설계단계 모델을 시공기간에 따라 선정한 지진재현주기를 적용했을 때의 층 하중을 나타낸 것이다. 모든 규모의 건물에서 시공단계의 층 하중은 설계단계 층 하중과 동등하거나 미만인 것이 확인되었으며 시공이 완료된 층은 설계단계의 층 하중 그래프와 비슷한 모양을 보이고 있지만 시공 중인 층에서는 마감하중이 재하되지 않으므로 시공이 완료된 층에 비해 강성이 낮아 설계단계와 다른 형태를 가진 것을 확인할 수 있다.

5층 규모건물의 1층 부분과 15층 규모건물의 3층 부분, 60층 규모건물의 30층 부분은 층하중이 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 필로티구조의 전이층이거나 아웃리거벽체가 설치된 층이기 때문에 다른 층에 비해 강성이 높아 층 하중이 큰 것을 확인할 수 있다. 25층 규모 건물의 15층 시공단계모델과 60층 규모 건물의 10층 시공단계 모델은 각 규모의 다른 시공단계모델보다 큰 층 하중을 나타내고 있는데 이는 건물이 시공되면서 건물의 높이가 증가하여 고유주기 상승으로 인한 지진 가속도의 감소가 자중의 증가로 인한 지진하중의 증가보다 더 큰 영향을 미쳐 나타난 결과이다.

Table 4 Result of modal analyses

Model	Construction Model	1st Mode	2nd mode	3rd mode
5-Story Building	Design	0.22s	0.14s	0.11s
		Rz(66%)	Dx(75.4%)	Dy(62.9%)
	5F completed	0.21s	0.13s	0.11s
		Rz(67.3%)	Dx(75.8%)	Dy(64%)
	4F completed	0.18s	0.1s	0.09s
		Rz(70.8%)	Dx(82.7%)	Dy(69.1%)
	3F completed	0.15s	0.07s	0.06s
		Rz(73.1%)	Dx(89.2%)	Dy(72.6%)
2F completed	0.12s	0.06s	0.05s	
	Rz(74.5%)	Dx(90.2%)	Dy(70.6%)	
1F completed	0.1s	0.04s	0.03s	
	Rz(73.5%)	Dx(89.9%)	Dy(71.4%)	
15-Story Building	Design	0.54s	0.47s	0.36s
		Dx(72.3%)	Dy(74.1%)	Rz(69.4%)
	15F completed	0.51s	0.44s	0.34s
		Dx(71.7%)	Dy(74.2%)	Rz(68.5%)
	12F completed	0.42s	0.32s	0.27s
		Dx(68.1%)	Dy(78.1%)	Rz(64.2%)
	9F completed	0.33s	0.23s	0.2s
		Dx(64%)	Dy(82.6%)	Rz(60.7%)
6F completed	0.24s	0.15s	0.14s	
	Dx(59.1%)	Dy(84.7%)	Rz(57.6%)	
3F completed	0.16s	0.1s	0.08s	
	Dx(54.4%)	Dy(81.2%)	Rz(54%)	
25-Story Building	Design	1.77s	1.31s	1.04s
		Rz(50.3%)	Dy(36.4%)	Dx(39.9%)
	25F completed	1.71s	1.27s	1.01s
		Rz(50%)	Dy(36%)	Dx(39.6%)
	20F completed	1.15s	0.89s	0.74s
		Rz(44.9%)	Dy(29.6%)	Dx(38.2%)
	15F completed	0.69s	0.56s	0.48s
		Rz(35.5%)	Dx(24.8%)	Dy(33%)
10F completed	0.36s	0.3s	0.25s	
	Dy(31.8%)	Dx(41.8%)	Dy(32.3%)	
5F completed	0.13s	0.11s	0.08s	
	Dy(46.8%)	Dx(57.9%)	Dy(31.1%)	
60-Story Building	Design	6.33s	4.98s	3.31s
		Dx(66.5%)	Dy(65.8%)	Rz(80.6%)
	60F completed	6.12s	4.88s	3.26s
		Dx(66.6%)	Dy(65.9%)	Rz(80.6%)
	50F completed	4.58s	3.61s	2.71s
		Dx(69.4%)	Dy(67.1%)	Rz(79.7%)
	40F completed	3.29s	2.61s	2.16s
		Dx(71.6%)	Dy(64.1%)	Rz(73.7%)
30F completed	2.28s	1.84s	1.6s	
	Dx(71.7%)	Dy(43.3%)	Rz(48.4%)	
20F completed	1.27s	1.14s	0.9s	
	Dx(67.5%)	Rz(62.1%)	Dy(57%)	
10F completed	0.67s	0.49s	0.42s	
	Rz(67.1%)	Dx(71.3%)	Dy(56.1%)	

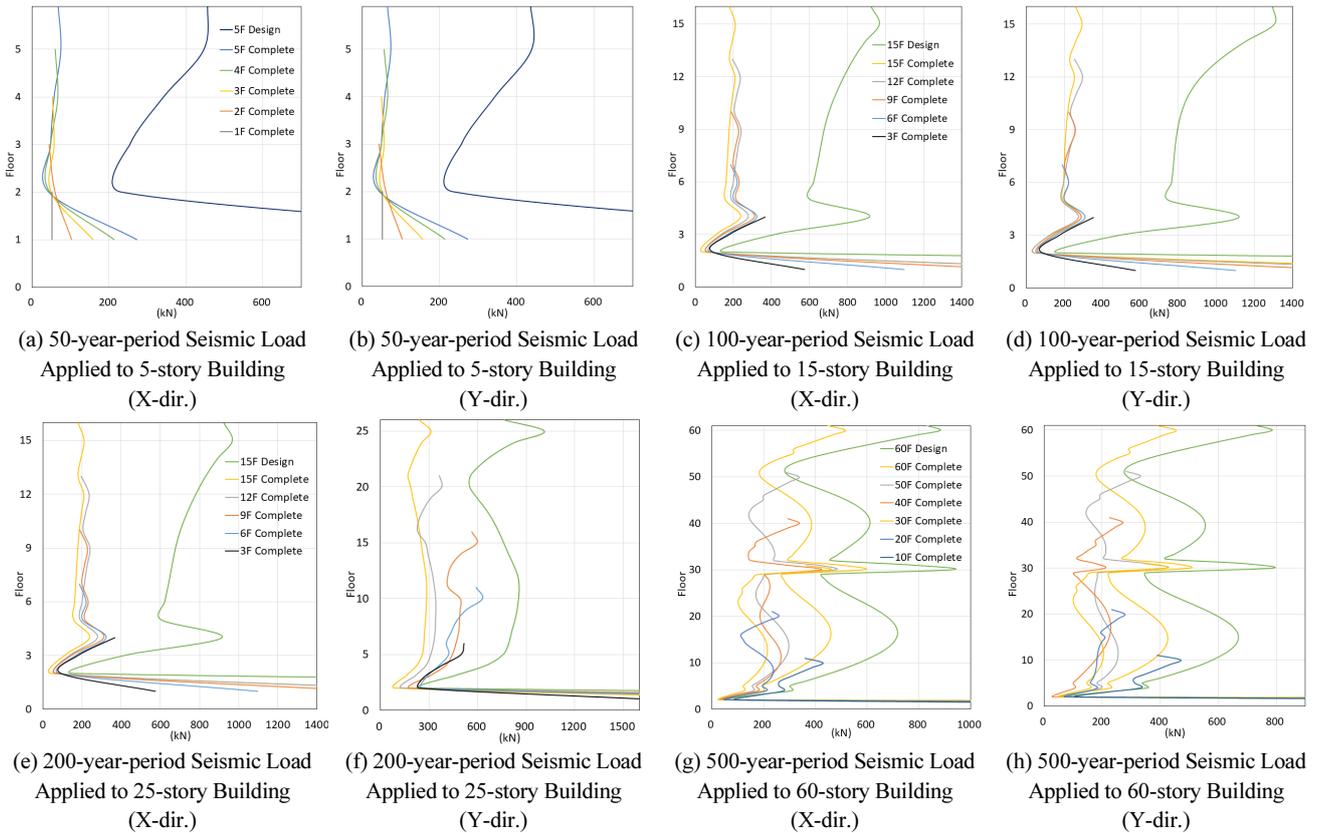


Fig. 2 Comparison of story force by applying seismic loads by return period

3.2 부재 단면성능

시공단계모델들의 벽체, 기둥, 보부재들에 대해 단면성능을 검토하였으며(Fig. 3), 단면성능은 이전연구(Choi and Kim, 2022)와 동일한 방법으로 식 (6), (7)을 통해 검토하였다.

$$R_{design} = \frac{P_{u.design}}{\phi P_{n.design}} \quad (6)$$

$$R_{const} = \frac{P_{u.const}}{\phi P_{n.const}} \quad (7)$$

Fig. 3의 가로축은 설계단계의 최대설계강도($R_{max.design}$)이고, 세로축은 시공단계의 최대설계강도비($R_{max.const}$)이다. 벽체와 기둥은 축력에 대한 설계강도비를 기준으로 분석하였으며, 보는 양끝단과 중심부 중에서 힘 모멘트의 설계강도비가 가장 높은 부분의 값을 추출하여 분석하였다. 설계단계모델은 2,400년 재현주기의 지진하중을 적용하였고 시공단계모델은 시공기간에 따라 선정한 재현주기의 지진하중(Table 1)을 적용하였다. 설계강도비가 1.0을 초과하는 경우는 부재의 설계강도보다 소요강도가 크기 때문에 구조적 안전성을 확보하지

못한다고 볼 수 있으며, 설계단계의 설계강도비를 초과하는 시공단계 부재는 설계 중 설계단계의 설계강도비가 1.0에 가깝게 설계될수록 시공단계에서 안전성을 확보하기 어렵다. 단면검토 결과 모든 규모의 건물은 시공기간에 따라 가정한 재현주기의 지진하중을 적용하였을 때 일부 부재에서 설계단계의 설계강도비를 초과하는 시공단계 부재가 존재하였다.

5층 규모의 건물은 1층 시공단계모델에서 보의 63%가 설계단계의 설계강도비를 초과하였는데(Fig. 3c) 설계단계의 설계강도비를 초과하는 보의 대부분이 중력하중으로만 조합된 하중조합에서 가장 큰 하중을 받고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 지진하중보다는 부재의 강도발현이 완전히 이루어 지지 않아 생긴 결과로 볼 수 있다. 15층 규모의 건물은 3층 시공단계모델에서 가장 많은 부재가 설계단계의 설계강도비를 초과하였다(Fig. 3d-f). 특히 보부재의 27%가 설계단계의 설계강도비를 초과하였는데(Fig. 3f), 해당 하는 부재는 모두 5층 규모의 건물과 마찬가지로 지진하중보다는 부재의 강도미발현으로 인한 영향으로 보인다. 25층 규모의 건물은 설계단계의 설계강도비를 초과하는 벽체부재는 1%미만이며(Fig. 3g), 보부재는 15층 시공단계모델에서 11.9%의 부재가 초과하여(Fig. 3i) 가장 높은 것으로 확인되었다. 하지만 시공이 진행됨에 따

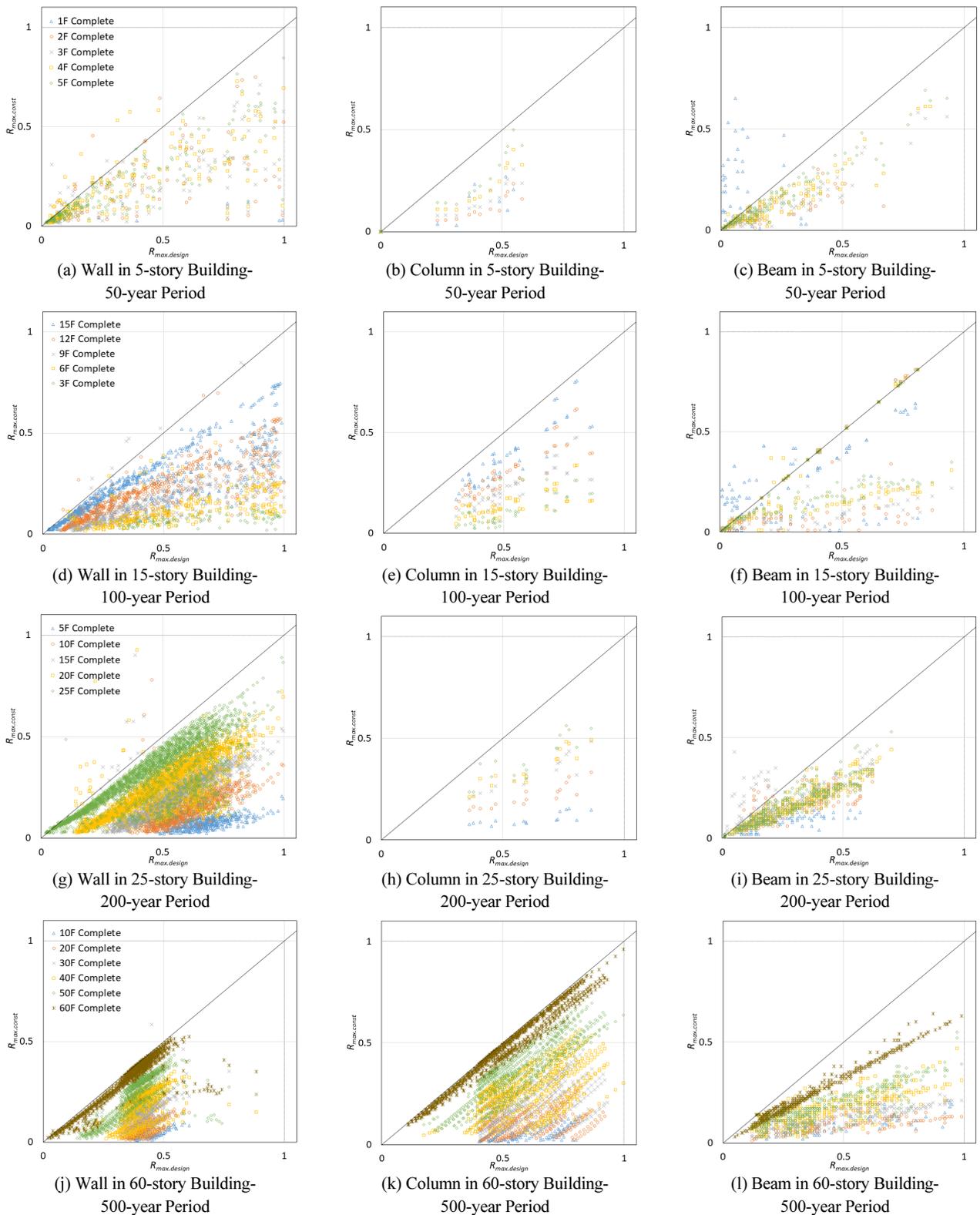


Fig. 3 Comparison of design strength ratio in structural members

라 감소하여 25층 시공단계모델에서는 1% 미만의 부재가 설계단계의 설계강도비를 초과하는 것으로 확인되었다. 60층 규모의 건물은 설계단계의 설계강도비를 초과하는 시공단계 부

재의 비율이 가장 적었다(Fig. 3j-l). 30층 시공단계 모델에서 아웃리거층의 1개의 벽체와 60층 시공단계 모델에서의 기둥과 벽체 13개의 부재가 설계단계의 설계강도비를 초과하였는

Table 5 Ratio of $R_{max,const}$ exceeding $R_{max,design}$

Model	Construction Model	$R_{max,const}$ exceeding $R_{max,design}$
5-story Building	1F Complete	44.62%
	2F Complete	4.52%
	3F Complete	5.71%
	4F Complete	6.87%
	5F Complete	0.94%
15-story Building	3F Complete	12.54%
	6F Complete	4.11%
	9F Complete	4.02%
	12F Complete	2.04%
25-story Building	15F Complete	0.39%
	5F Complete	1.24%
	10F Complete	1.84%
	20F Complete	0.95%
60-story Building	25F Complete	0.95%
	10F Complete	0%
	20F Complete	0%
	30F Complete	0.08%
	40F Complete	0%
	50F Complete	0%
	60F Complete	0.51%

데 이는 재료의 강도가 발현되기 이전에 소요강도가 민감하게 증가하여 생긴 결과이다. 모든 건물의 시공단계에서는 Table 1에서 제시한 시공기간에 따른 재현주기의 지진하중을 적용할 때 설계강도비 1.0을 초과하는 부재는 존재하지 않았으므로 구조적 안전성을 확보하였다.

4. 시공 중 부재 단면성능 분석

Table 5는 모든 부재에 대해서 설계단계의 설계강도비를 초과하는 설계강도비를 가진 시공단계 부재의 비율을 나타낸 표이다. 그리고 Fig. 4는 설계단계의 설계강도비를 초과하는 시공단계 부재에 가장 큰 소요하중으로 작용하는 하중조합, 즉 설계시배 하중조합을 지진하중 포함여부에 따라 분류한 그래프이다. 5층 규모의 건물은 공사가 시작된 시점과 가장 가까운 1층 시공단계모델에서 가장 많은 부재가 설계단계의 설계강도비를 초과하였다. 이는 콘크리트의 강도가 완전히 발현되지 않았기 때문이며, 해당하는 대부분의 부재가 중력하중으로 조합된 하중조합이 가장 큰 소요하중으로 작용하는 것을 확인하였다. 또한 2-5층 시공단계 모델에서 설계단계의 설계강도비를 초과하는 시공단계 부재도 1층 시공단계와 마찬가지로 대부분의 부재는 지진하중보다는 중력하중이 더 지배적으로 작용한 것으로 확인되었다. 가정된 시공기간이 가장 짧아 50년 재현주기의 작은 지진하중을 적용하였기 때문에 상대적으로 중력하중에 비해 지진하중이 작아 생긴 결과로 보인다.

15층 규모의 건물은 3층 시공단계 모델에서 가장 많은 부재

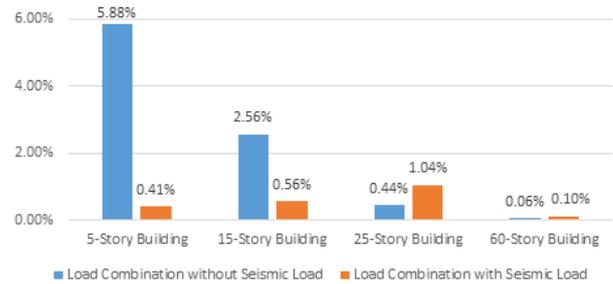


Fig. 4 Ratio of load combination that governs structural design members of $R_{max,const}$ exceeding $R_{max,design}$

가 설계단계의 설계강도비를 초과하였으며, 시공이 진행됨에 따라 비율이 점차 감소하였다. 지진하중이 포함된 하중조합에 의해 설계단계의 설계강도비를 초과한 부재는 0.56%로 지진하중이 포함되지 않은 하중조합에 의해 설계단계의 설계강도비를 초과한 부재에 비해 작은 비율을 가지고 있지만 5층 규모의 건물보다 비율의 차이가 적었다.

25층 규모의 건물은 15층 시공단계모델에서 설계단계의 설계강도비를 초과하는 시공단계 부재의 비율이 가장 높았으며, 지진하중이 포함된 하중조합에 의해 설계단계의 설계강도비를 초과한 부재가 지진하중이 포함되지 않은 하중조합에 의해 설계단계의 설계강도비를 초과한 부재보다 큰 비율을 차지하여 중력하중보다 지진하중이 더 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.

60층 규모의 건물은 가장 긴 시공기간으로 인해 재현주기 500년의 지진하중을 적용하였지만 다른 규모의 건물에 비해 설계단계의 설계강도비를 초과하는 시공단계 부재의 비율이 가장 낮았다. 25층과 마찬가지로 하중조합의 지진하중을 포함 여부에 따른 설계단계의 설계강도비를 초과한 부재비율은 차이가 있었으며 지진하중을 포함했을 때 더 높았다. 따라서 상대적으로 중력하중에 비해 지진하중의 영향이 더 크다고 볼 수 있으며, 25층 규모의 건물보다는 영향이 적다. 또한 지진하중에 의해 설계단계의 설계강도비를 초과한 절대적인 부재비율은 60층 규모의 건물이 가장 작으므로 다른 규모의 건물에 비해 지진하중에 대한 영향이 적었다.

5. 결론

이 연구에서는 각기 다른 규모의 주거용 철근콘크리트 건축물들을 대상으로 시공 단계에서의 지진재현주기에 따른 영향을 분석하였다. 5층, 15층, 25층, 60층 건물의 시공기간에 따라 동일 발생확률의 지진재현주기를 선정하여 적용하고, 시공단계 모델과 설계단계 모델을 구성하여 구조해석 및 구조성능 분석을 수행하였다. 구조해석 및 분석 결과를 바탕으로 한 결론은 다음과 같다.

- 1) 모든 규모의 건물은 가정된 시공기간에 따른 재현주기의 지진을 적용한 결과 시공단계의 층하중은 설계단계 층하중과 동등하거나 미만수준인 것을 확인하였다.
- 2) 선정된 재현주기의 지진을 적용할 때 모든 규모의 건물에서 설계단계보다 높은 설계강도비를 가진 부재가 일부 존재하지만 설계강도비 1.0을 초과하는 부재는 존재하지 않았으므로 구조적으로 안전하다 할 수 있다.
- 3) 규모가 커질수록 지진하중이 포함된 하중조합에 의해 설계단계의 설계강도비를 초과한 부재비율이 증가하여 25층 규모의 건물에서 가장 높았으며, 60층 규모의 건물에서는 가장 작았다. 따라서 25층 규모의 건물이 다른 규모의 건물에 비해 지진하중에 대한 영향이 크다고 할 수 있다.

이와 같이 주거용으로 많이 사용되는 건물에 대하여 검토한 결과 시공기간에 따라 선정된 재현주기의 지진을 적용할 때 모든 예제모델에서 설계단계의 설계강도비를 초과하는 부재가 일부 존재하였다. 15층 이하 규모의 건물에서는 중력하중이 지배적으로 작용하고 25층 이상 규모의 건물에서는 지진하중이 지배적으로 작용하였으며 25층 규모의 건물에서 지진하중에 대한 영향이 가장 컸다. 또한 모든 규모의 건물에서 설계강도비 1.0을 초과하는 부재는 존재하지 않는 것으로 확인되어 구조적으로 안전한 것을 확인하였다. 하지만 본 연구는 건물의 규모에 따라 시공 중 지진하중의 영향을 분석하였지만 각 규모의 건물이 다른 모든 건물을 대표할 수는 없으므로 더 다양한 형태의 건물에 대하여 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원에 의한 한국연구재단의 지원(NRF-2019R1A2C1011667)과 2022년 광운대학교 우수연구자 지원 사업에 의해 수행된 연구입니다.

References

American Society of Civil Engineers (2014) *Design Loads on Structures During Construction*, American Society of Civil Engineers (ASCE 37-14).

Choi, S.H., Kim, J.Y. (2022) Effects of Seismic Loads With Different Return Period on Residential Building with RC Shear Wall Structure under Construction, *J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp.*, 26(2), pp.43~50.

Cornell, C.A. (1968) Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58(5), pp.1583~1606.

Hwang, Y.J., Kim, J.Y. (2015) Analyses of Structure Performaces for RC High-Rise Residential Complex Building under Construction, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(1), pp.19~27.

Ko, J.Y., Kim, J.Y. (2019) Analyses of Structural Performances for Reinforced Concrete Middle-Rise Residential Building under Construction, *J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp.*, 23(5), pp.96~103.

Korean Design Standard (2019a) *Architectural Structural Standard Design Loads* (KDS 41 10 15).

Korean Design Standard (2019b) *Seismic Design Criteria for Buildings* (KDS 41 17 00).

Korean Design Standard (2021) *Concrete Structure Analysis and Design Principles* (KDS 14 20 10).

Korean Design Standard (2022) *Concrete Structure Design (Design strength method)* (KDS 14 20 01).

Mays, L.W. (2010) *Water Resources Engineering*, John Wiley & Sons.

MIDAS (2022) *MIDAS Structural Technical Lecture Series*.

요 지

시공 중인 건물은 시공이 완료된 건물과는 다르게 콘크리트의 강도발현이 충분히 이루어지지 않았기 때문에 지진과 같은 자연재해에 더 취약한 모습을 가질 수 있다. 현재 국내 기준은 건축물의 내진등급별 최소성능 목표를 제시하고 있지만, 설계를 위한 지진하중은 재현주기 2,400년의 지진위험도를 기반으로 한다. 하지만 건물의 시공기간은 건물의 사용기간보다 훨씬 짧기 때문에 재현주기 2,400년의 지진을 시공 중인 건물에 적용하는 것은 과도하다. 따라서 이 연구는 주거용으로 사용되는 철근콘크리트 건물의 시공 중 지진하중을 분석하기 위해 5층, 15층, 25층, 60층 건물의 시공단계모델을 작성하고 재현주기에 따라 저감한 지진하중을 적용하여 구조적 안정성을 확인하였다. 그 결과, 시공기간에 따라 선정된 재현주기의 지진을 적용할 때 구조적 안정성을 확인하였으며, 건물의 규모의 따라 구조적 안정성을 확보할 수 있는 지진재현주기를 확인하였다.

핵심용어 : 철근콘크리트, 시공 중 구조성능, 주거용 건물, 지진하중, 시공기간