

단주효과 및 고유주기를 고려한 비내진 학교시설의 반응 수정계수

Response Modification Factors of Non-seismic School Buildings Considering Short Column Effects and Natural Period

김범석¹⁾ · 박지훈^{2)*}

Kim, Beom Seok¹⁾ · Park, Ji-Hun^{2)*}

¹⁾인천대학교 일반대학원 건축학과 석사과정, ²⁾인천대학교 도시건축학부 교수

¹⁾Graduate Student, Department of Architectural Design and Engineering, Incheon National University, ²⁾Professor, Division of Architecture and Urban Design, Incheon National University

/ A B S T R A C T /

Response modification factors of school facilities for non-seismic RC moment frames with partial masonry infills in 'Manual for Seismic Performance Evaluation and Retrofit of School Facilities' published in 2018 were investigated in the preceding study. However, since previous studies are based on 2D frame analysis and limited analysis conditions, additional verification needs to be performed to further apply various conditions including orthogonal effect of seismic load. Therefore, this study is to select appropriate response modification factors of school facilities for non-seismic RC moment frames with partial masonry infills by 3D frame analysis. The results are as follows. An appropriate response modification factor for non-seismic RC moment frames with partial masonry infills is proposed as 2.5 for all cases if the period is longer than 0.6 seconds. Also if the period is less than 0.4 seconds and the ratio of shear-controlled columns is less than 30%, 2.5 is chosen too. However, if the period is less than 0.4 seconds and the ratio of shear-controlled columns is higher than 30%, the response modification factor shall be reduced to 2.0. If the period is between 0.4 and 0.6 seconds, then linearly interpolates the response correction factor.

Key words: Non-seismic school buildings, Seismic performance evaluation, Response modification factor, Partial masonry infill

1. 서론

최근 들어 지진화산재해대책법에 따른 공공시설 내진성능평가의 일환으로 학교시설의 내진성능평가와 보강이 활발히 이루어지고 있다. 이 과정에서 학교시설의 특성을 고려하고 건축구조기준과의 일관성도 갖출 수 있도록 학교시설 내진설계기준[1]이 개정되고 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼(이하 학교시설 매뉴얼)[2]이 개발되었다. 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼은 일반 구조기술자들이 쉽게 습득하여 다수 학교시설의 내진성능을 신속하게 평가할 수 있도록 건축구조기준(Korean Building Code, KBC 2016)[3]에 기초한 선형해석 평가법을 새로 제시하였다.

선형해석 평가법은 반응수정계수에 기초한 선형정적 또는 선형동적 해

석법을 사용한다. 그러나 건축구조기준의 반응수정계수는 내진설계된 건물을 대상으로 하는 반면에 내진성능평가의 대상이 되는 기존 학교건물은 대부분 내진설계가 적용되지 않았고 건축구조기준에서 명확한 해석 및 설계법을 제시하고 있지 않은 무보강 조적채움벽 및 허리벽을 대부분 포함하고 있다. 허리벽은 단주효과로 인해 인접한 기둥에 전단파괴가 발생할 가능성을 증가시켜며 결과적으로 일반 모멘트골조에 비해 연성이 감소하게 된다. 학교시설 매뉴얼은 이를 고려하여 '내진설계에 반영되지 않은 허리벽이 있는 철근콘크리트모멘트골조'의 반응수정계수를 2.5로 제시하였다. 이는 건축구조기준에서 철근콘크리트구조기준의 일반규정만을 만족하는 철근콘크리트구조 시스템의 반응수정계수 3.0을 단주효과에 의한 취성거동을 고려하여 낮춘 값이다. 그러나 단주효과에 의해 전단기배 거동을 하는 부재의 비중에 따라서 연성의 감소폭은 증가할 것으로 예상되므로 때문에 적절한 반응수정계수에 대한 연구가 필요하다.

반응수정계수와 관련된 연구로서 우경선 등[4]은 높이 및 깊이 등 추가 조건을 적용하여 철근콘크리트 보통모멘트 골조의 적정 반응수정계수를

*Corresponding author: Park, Ji-Hun

E-mail: jhpark606@inu.ac.kr

(Received February 26, 2019; Revised May 2, 2019; Accepted May 3, 2019)

선정하였다. 또한 정우진 등[5]은 중간모멘트골조를 갖는 이중골조 시스템에 대해 높이 및 평면별 적정 반응수정계수를 분석하였다. 한상환 등[6]은 국내·외 전단벽 실험결과를 토대로 주기별 전단벽 골조의 적정 반응수정계수를 제안하였다. 한아름 등[7]은 FEMA P695[8]를 통해 국내 저층 철골 중간모멘트골조의 반응수정계수를 계재 당시 기준인 KBC2009[9]에서 제시한 4.5를 일부 조건에서 6.0까지 상향적용 할 수 있음을 나타내었다. Kang CK 등[10]은 철골모멘트골조의 파괴메카니즘, 구조시스템 및 층수 등의 설계변수를 적용하여 적정 반응수정계수의 평가방법 및 절차를 제안하였다. Abdollahzadeh 등[11]은 다양한 층수 및 가새골조 시스템을 적용하여 철골가새 골조의 적정 반응수정계수를 제안하였다. Fanaie 등[12]은 순수 철골골조 및 철근콘크리트골조 대비 철골 및 철근콘크리트가 혼합된 골조에서 낮은 반응수정계수가 선정됨을 나타내었다. 이와 같이 대부분의 선행연구는 일반적인 골조 시스템에 대해 추가 조건을 적용하여 차등화된 반응수정계수를 제안하고 있다.

선행연구에서 알 수 있듯이 학교시설과 같이 조적허리벽이 있는 철근콘크리트 비내진 모멘트골조의 반응수정계수에 대한 연구는 미미한 실정이다. 다만 김범석 등[13]은 평면골조의 선형 및 비선형 내진성능 평가결과를 비교하여 조적허리벽이 있는 중저층 비내진 철근콘크리트 모멘트골조의 반응수정계수를 제시하였다. 이 연구에서는 3층 평면골조의 경우 전단지배형 기둥이 차지하는 비중이 10% 미만 및 이상인 경우에 대하여 각각 $R = 2.0$ 및 1.5를 제안하였고, 5층의 경우 전단지배형 기둥이 차지하는 비중이 55% 미만 및 이상인 경우에 대하여 각각 $R = 2.5$ 및 2.0을 제안하였다.

이 연구에서는 선행연구[13]의 한계를 극복하기 위하여 3차원 골조해석을 수행하고 건물의 층수와 지반조건 및 부재 모델링 측면에서 확장된 해석 조건을 고려하여 다양한 선형 및 비선형 해석을 수행하고 반응수정계수에 영향을 주는 요인을 도출하였으며, 최종적으로 학교시설 매뉴얼의 선형해석 평가법에 적용하기 위한 ‘내진설계에 반영되지 않은 허리벽이 있는 철근콘크리트모멘트골조’의 반응수정계수를 제안하였다.

2. 해석모델 개요

다양한 층수의 해석모델을 작성하기 위해 실제 학교시설의 구조적 특성을 조사하여 Table A1에 나타내었다. 또한 층별로 가장 많이 나타난 재료 강도로 설계된 학교시설을 기준으로 기둥 단면의 평균에 대해 가장 근사한 단면적을 갖는 학교시설을 선정하여 Table A2에 나타내었으며 이를 해석 모델에 반영하였다. 대부분의 학교시설은 5층 이하의 건물임을 고려하여 2~5층의 해석모델을 작성하였다. 단, 2층 모델의 경우 조사 자료가 충분치 않은 점을 고려하여 3층 학교시설의 부재 속성을 활용하였다. 학교시설은 대부분 표준도면에 가깝게 건설되었으므로 각 모델의 경간 크기와 수량은 동일하게 가정하였다. 이 가운데 3층 모델의 예시를 Fig. 1(a)에, 해석모델에 적용된 등분포 고정하중 및 활하중을 Fig. 1(b), (c)에 나타내었다.

조적채움벽 및 허리벽의 경우 등가스트럿 모델을 사용하여 Fig. 2와 같이 모델링하였으며, 해당 부재의 중량을 고려하기 위해 단위중량 19.6 kN/m³을 적용하였다. 등가스트럿 모델의 경우 압축만 저항할 수 있으나 단일 모델을 사용하여 다양한 하중조합에 대한 평가를 수행하기 위하여 학교 시설 매뉴얼에 따라 양방향 가새를 사용하여 모델링하였다. 조적허리벽의

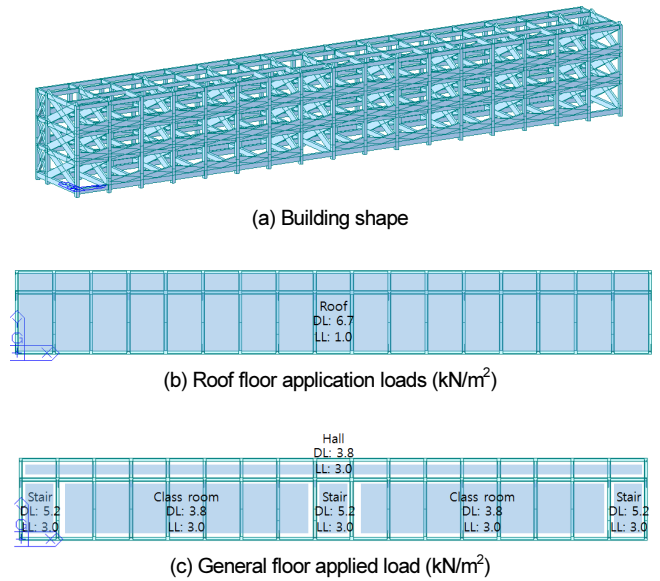


Fig. 1. Structure analysis model with partial masonry infills (3F)

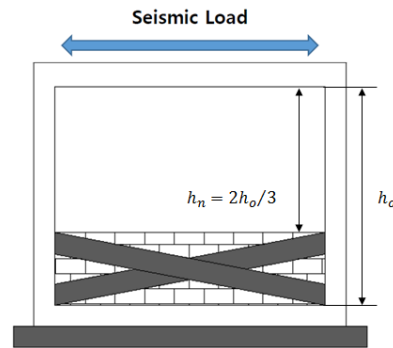


Fig. 2. Equivalent strut models for partial masonry infills

로 인한 단주의 순길이 h_n 는 일반 기둥길이 h_o 의 2/3 정도로 파악되어 이를 반영하였다. 재료강도는 학교시설 매뉴얼에 제시된 ‘양호’의 값을 적용하여 설계기준 압축강도 f'_m 및 전단강도 f_{vt} 에 대해 각각 6.2 MPa 및 0.19 MPa를 적용하였다. 보와 기둥은 학교시설 매뉴얼에 따라 유효강성을 적용하여 모델링하였으며 비선형해석모델의 경우에 지배거동의 분류에 따라서 학교시설 매뉴얼에 제시된 모델링 변수 및 허용기준을 적용하여 모델링하였다. 조적채움벽 및 허리벽은 선형해석의 경우 가새가 인장 및 압축에 모두 저항하므로 압축에만 저항하는 스트럿과 유사한 강성을 나타내도록 스트럿의 강성을 1/2로 낮추어 모델링 하였다[2]. 그러나 비선형해석의 경우 강성을 낮추지 않고 압축에만 저항하는 가새로 모델링하였다.

3. 선형해석평가법 적용

3.1 평가절차

선형해석평가는 학교시설 매뉴얼을 따랐으며, 그 절차를 요약하면 Fig. 3과 같다. 선형구조해석의 방법은 KBC2016과 동일하다. 선형해석평가시 조적허리벽을 갖는 철근콘크리트모멘트골조의 경우 기둥, 보, 조적허리벽

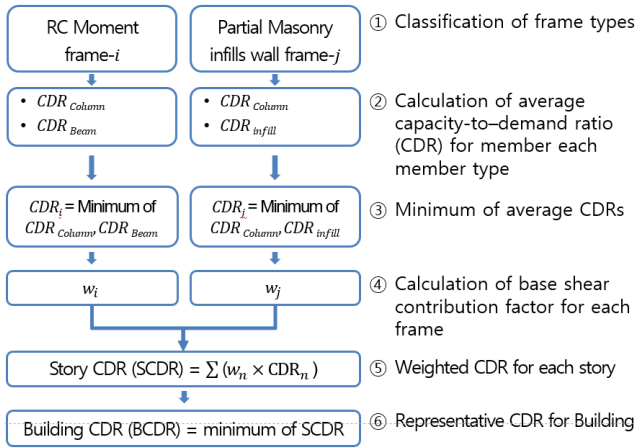


Fig. 3. Linear analysis evaluation procedure

에 대해 평가한다. 그러나 통상적으로 조적허리벽 위의 단주기둥 부분에 손상이 집중되고 그 외 부분은 상대적으로 손상이 적다. 따라서 해석의 간편성을 위해 허리벽 밑부분 기둥과 허리벽을 제외하고 평가를 수행하였다.

3.2 하중조합 및 지진하중

학교시설 매뉴얼의 선형해석 평가법에 적용되는 하중조합은 기본적으로 KBC2016과 동일하다. 그에 따라 주방향 지진하중 대 직교방향 지진하중의 비율을 100 : 30으로 적용한 다축가진 효과가 반영된다.

$$1.2D + 1.0L \pm 1.0EX \pm 0.3EY \quad (1)$$

$$0.9D \pm 1.0EX \pm 0.3EY \quad (2)$$

여기서 지진하중 E_x , E_y 는 최대예상지진의 2/3수준에 중요도 계수 1.2를 고려한 설계지진하중을 적용하였다. 이는 내진 I 등급으로 분류되는 학교 시설을 인명안전수준에 대하여 평가하기 위함이다. 응답스펙트럼 해석법을 사용하여 KBC2016에 따라 등가정적 지진하중의 85% 수준이 되도록 보정계수 C_m 을 적용하였다. 모든 지반조건에 대해 보정계수를 산정한 결과 2층 및 3층의 경우 각각 1.05배 및 1.04배로서 지진하중의 조정이 1.0에 근사하였다. 그러나 4층 및 5층의 경우 지반조건별 각각 최대 1.38 및 1.59 배에 해당하는 조정이 이루어졌다. 등가정적 지진하중 산정 시 적용된 주기 약산식은 KBC2016에서 기타골조에 해당하는 식을 적용하였다. 이 연구에서는 KBC2016에서 허용되는 주기상한 계수를 이용하여 증가시키지 않은 원래의 약산식 주기를 적용하여 등가정적 지진하중을 산정하였음을 유의할 필요가 있다.

4. 반응수정계수 선정

4.1 해석조건 및 성능판정기준

해석조건은 지반조건, 전단지배형 기둥의 전단강도 $V_{n,sc}$ 및 비율 r_{sc} 등

Table 1. Analysis conditions

Site class	Shear strength of columns controlled by shear ¹⁾ ($V_{n,sc}$)	Ratio of column controlled by shear (r_{sc})
S_B	$0.8V_p$	0%
	$1.0V_p$	18% 29%
$S_{D,20m \downarrow}$	$0.8V_p$	41%
	$1.0V_p$	53% 60%

¹⁾ V_p is defined as the shear demand at flexural yielding status

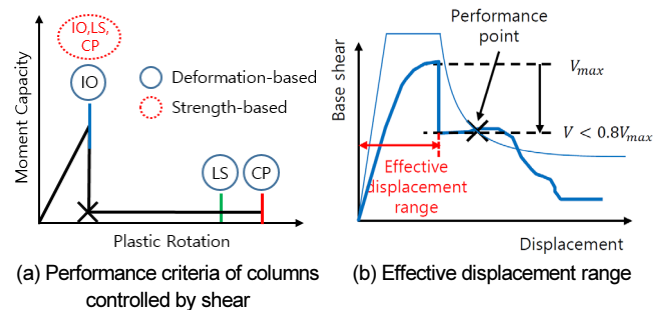


Fig. 4. Seismic performance evaluation criteria

Table 2. Performance decision criteria for nonlinear static procedure

Criteria ID	①	②
Performance criteria of columns controlled by shear	Strength-based	Deformation-based
Allowable ratio of gravity load supported by collapsed members	0%	
Effective displacement range	Applied	

의 해석조건을 Table 1과 같이 적용하였다. 해석조건은 기본적으로 선형연구[13]와 동일하게 적용하였다. 지반조건은 경우 비교적 단단한 지반과 상대적으로 연약한 지반을 하나씩 선정하여 검토하였다. 또한 연성능력에 따라 판정결과가 상이하게 나타날 것으로 판단되어 전단지배형 기둥의 전단강도 $V_{n,sc}$ 및 비율 r_{sc} 등을 해석조건으로 반영하였다.

비선형해석에서 전단지배형 기둥의 판정기준(Fig. 4(a)) 및 학교시설 내진설계 기준의 유효변위구간(Fig. 4(b)) 등의 내진성능 판정기준을 반영하여 Table 2와 같이 적용하였다. 전단지배형 기둥의 판정기준은 강도 및 변형기반 평가로 분류되며 전자는 전단강도에 해당하는 변형을 넘어서면 붕괴된 것으로 보고 후자는 성능수준별 변형량 허용기준으로 평가한다. 유효 변위구간은 비선형정적해석의 하중-변위 곡선에서 최대밀면전단력 V_{max} 의 20% 이상 급격한 하중저하가 발생하는 지점까지를 말하며, 구간 이후의 성능점에 대해서는 유효하지 못한 것으로 보고 붕괴로 판정한다.

4.2 선정절차

반응수정계수 선정절차는 기본적으로 선형연구[13]에 제시된 것과 동일하며 이를 Fig. 5에 나타내었다. 적정 반응수정계수의 기본 조건은 1) 선형해석 및 비선형정적해석의 성능평가결과가 일치하고, 2) 비선형정적해

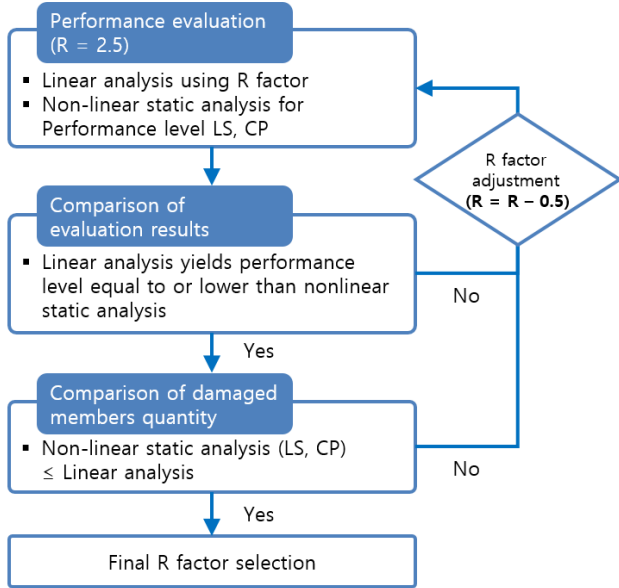


Fig. 5. R factor selection procedure

석 대비 선형해석의 수직부재 손상수량이 같거나 더 많게 평가되는 반응수정계수로 정의한다. 해석절차별 성능평가 결과가 상이하거나 비선형정적 해석 대비 선형해석의 수직부재 손상수량이 적을 경우 반응수정계수를 0.5 씩 하향 조정하여 재평가한다.

4.3 반응수정계수 선정결과

3차원모델의 내진성능평가로부터 선정된 반응수정계수의 전반적인 경향을 파악하기 위해 해석조건별 강도기반(①) 및 변형기반(②) 평가에서 각각 보수적으로 선정되는 반응수정계수를 나타내었다.

평가결과 인명안전(LS) 및 붕괴방지(CP) 수준에 대해 각각 Figs. 6~7 과 같이 반응수정계수가 선정되었다. r_{sc} 가 증가할수록 또한 층수가 낮을 수록 작은 반응수정계수가 선정되었다. $V_{n,sc}$ 가 작은 경우에 높은 반응수정 계수가 선정되는 경향은 구조물의 취약성으로 인해 이미 충분히 보수적 평가결과가 산출되기 때문이다. 대체적인 선정경향은 선형연구[13]의 평면 골조 결과와 유사하나 대체적으로 높은 값이 선정되었다. 이는 장변방향 골 조 중 중앙부의 순수 모멘트 골조로 인해 평면골조 대비 연성능력이 높게 평가된 결과로 판단된다. 기둥의 성능판정 기준에 따른 선정결과와의 차이를 살펴보면 허용기준이 더 엄격한 강도기반 기준 적용 시 변형기반 기준 적용 대비 낮은 반응수정계수가 선정되었다. 또한 비선형정적해석의 인명안전 및 붕괴방지구간에 대해 반응수정계수를 선정할 결과 붕괴방지구간에서 낮은 반응수정계수가 선정되었다. 2층 건물에서는 1.5까지도 낮아지는데 이는 비선형정적해석 시 성능수준은 양호하나 유효변위구간으로 인해 붕괴로 판정되어 낮은 반응수정계수가 선정된 것으로 나타났다.

성능판정기준 중 비선형정적해석 시 적용되는 유효변위구간은 전단지 배형 기둥의 강도기반 평가법의 개념과 유사하다. 이는 유효변위구간 자체 로서 강도기반 평가를 포괄하는 것으로 볼 수 있으며 유효변위구간 적용 시 건물의 강도 측면에서는 충분히 안전측 결과를 선정할 수 있다. 따라서 이를 반영하여 변형기반 선정결과인 Fig. 6(b) 및 Fig. 7(b)를 비교하여 낮게 선

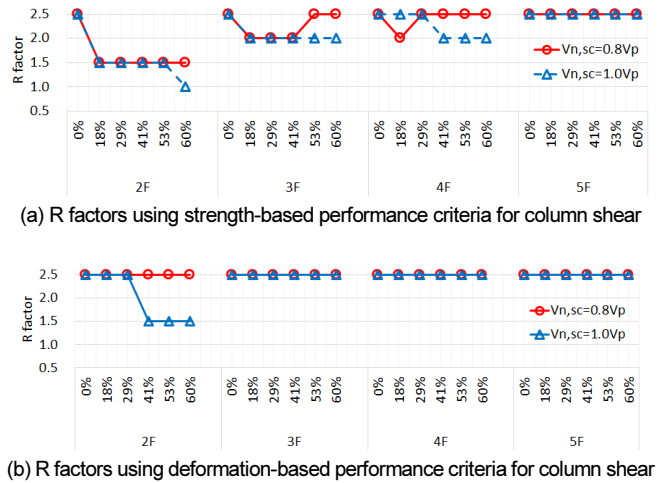


Fig. 6. Candidates of R factors for LS performance

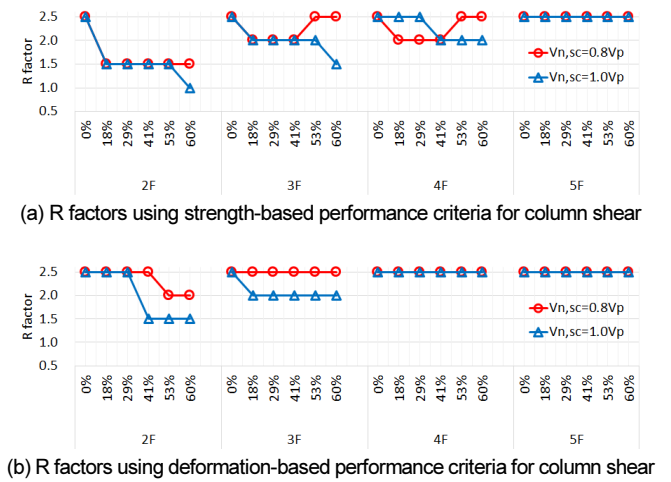


Fig. 7. Candidates of R factors for CP performance

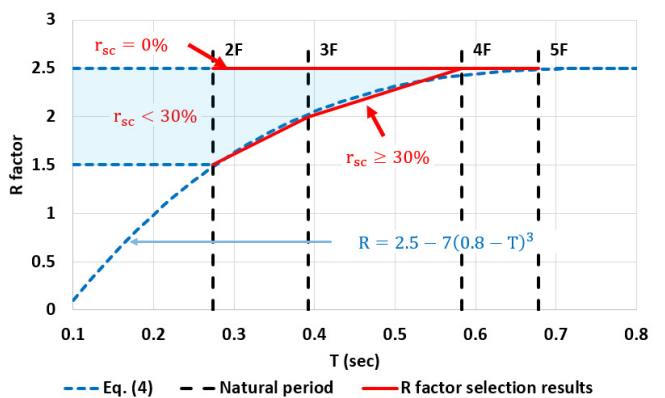


Fig. 8. R factor vs natural period for different r_{sc} 's

정된 반응수정계수를 T 및 r_{sc} 별로 Fig. 8에 재정리하였다. 또한 선정경향을 토대로 주기 T 및 r_{sc} 에 따른 반응수정계수 제안식을 도출하였다.

$$R = 2.5 - 7(0.8 - T)^3 \geq R_0 \quad (3)$$

Table 3. Results of calculation C_m factor by site class

Site Class	C_m			
	2F	3F	4F	5F
S_B	1.05	1.04	1.38	1.58
$S_{D,20m}$	1.05	1.04	1.27	1.59

$$R_o = \begin{cases} 2.5 & r_{sc} = 0\% \\ 1.5 & r_{sc} \geq 30\% \end{cases} \quad (4)$$

여기서, R : 제안식으로 선정된 반응수정계수($R \leq 2.5$)

T : 건축물의 고유주기

R_o : r_{sc} 에 따른 최소 반응수정계수

r_{sc} : 전단지배형 기둥의 비율

식(3)은 Fig. 8의 포물선형 점선으로서 전체적으로 주기가 감소함에 따라 연성이 감소하고 반응수정계수도 작은 값을 적용할 필요가 있음을 나타낸다. 그러나 전단지배 기둥의 비율에 따라서 식(4)의 하한치보다 작을 필요는 없다. 다만 r_{sc} 가 0%와 30% 사이의 경우는 이하에서 추가적인 검토를 통해 적용 방법을 제시한다. 특히 건축구조기준에 규정된 조적조 건물의 반응수정계수인 1.5보다 낮은 값을 적용할 필요는 없다고 판단하였다. 장주기 구조물의 경우에 Table 3과 같이 등가정적지진하중에 의한 밀면전단력의 보정 정도가 크기 때문에 상대적으로 안전측의 평가가 이루어지고 $R = 2.5$ 의 적용이 가능하다.

4.4 부재 허용기준 및 재료강도의 영향

4.4.1 검토대상 선정

제안식으로 반응수정계수를 산정한 결과 상대적으로 짧은 주기를 갖는 학교시설의 경우 반응수정계수가 1.5까지 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 KBC2016에서 제시한 무보강 조적전단벽의 반응수정계수 1.5와 동일하기 때문에 철근콘크리트 모멘트골조가 병존하는 구조물에서 지나치게 보수적인 값이다. 따라서 이를 검토하기 위해 2층 및 3층의 반응수정계수를 재평가 하였으며, 이 때 전단지배형 기둥의 모델링을 Fig. 9와 같이 조정하였다. 조정 방안은 기존의 정점 후 강도 상실 모델(Model 2)에서 변형연화(strain softening) 모델(Model 1)로 조정하여 급격한 하중감소를 방지한 것으로서 실제로 전단파괴가 발생한 기둥의 실험결과를 참조 시 전단파괴 후 급격하게 강도가 감소되기 보다는 완만하게 감소함이 알려져 있다[14].

또한 주기에 따라 반응수정계수가 변동하는 구간에 위치하는 3층 및 4층 모델에 대해 재료강도를 낮추어 선정결과를 검토하고자 하였다. 이를 위해 Table A1의 조사결과에 따라 재료강도가 가장 낮게 평가된 $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$, $f_y = 240 \text{ MPa}$ 을 3층 및 4층 모델에 적용하였다.

4.4.2 내진성능 및 반응수정계수 검토결과

첫 번째로 2층 및 3층 해석모델에 전단지배형 기둥의 모델링을 Fig. 9의 Model(1)과 같이 적용한 결과 유효변위구간을 만족시켜 모델링 방법별 판

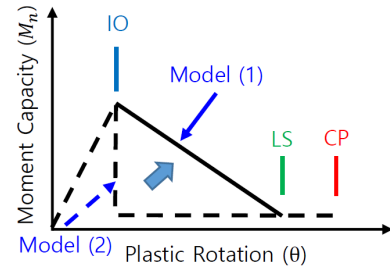
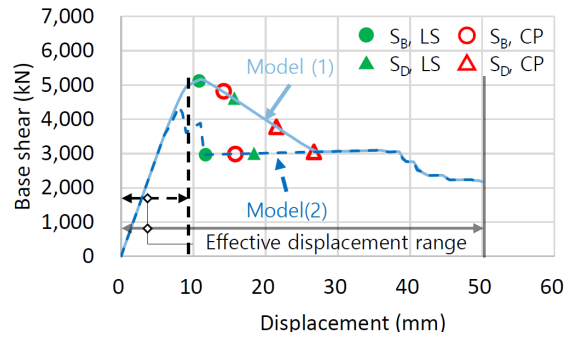
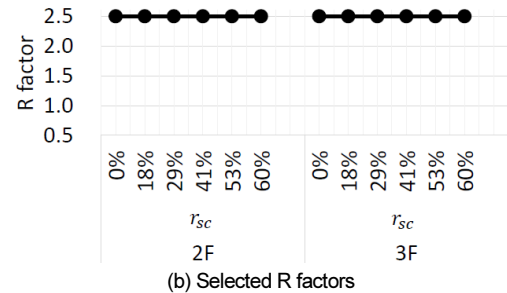


Fig. 9. Modeling parameters of columns controlled by shear



(a) Results of nonlinear static analysis (2F, $r_{sc} = 41\%$, $1.0 V_p$)



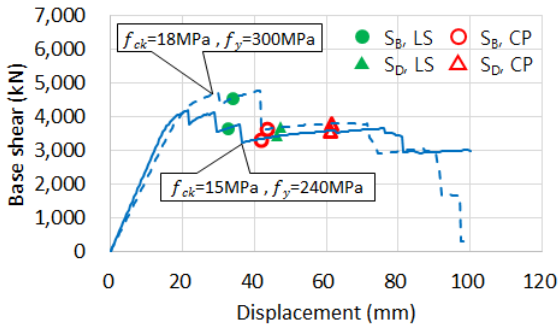
(b) Selected R factors

Fig. 10. Influence of gradually degrading column shear model

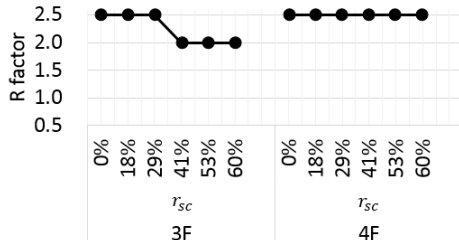
정결과가 상이하게 나타났다. 예시로 Fig. 10(a)에 2층, $1.0V_p$, $r_{sc} = 41\%$ 모델의 비선형정적 해석결과를 나타내었다. 반응수정계수를 재산정한 결과 Fig. 10(b)와 같이 모든 조건에 대해 2.5가 선정되어 상대적으로 단주기인 2층 및 3층 모델의 경우 일부조건에서 반응수정계수가 상향되는 것으로 나타났다. 특히 2층 모델의 $r_{sc} \geq 30\%$ 에서 큰 폭으로 증가한 것은 비선형 해석의 성능점이 유효변위구간 내에 형성되는 것으로 변화하였기 때문이다.

다음으로 3층 및 4층 모델에 재료강도를 하향적용 한 결과 건물의 성능이 저하되었으며 예시로 Fig. 11(a)에 4층, $0.8V_p$, $r_{sc} = 30\%$ 모델의 비선형정적 해석결과를 나타내었다. 단, 3층 모델의 경우 Fig. 10의 해석결과를 반영하여 전단지배형 기둥을 Model(1)과 같이 적용 후 반응수정계수를 선정하였다. 선정결과 반응수정계수는 Fig. 11(b)와 같이 나타났다. 4층 모델의 경우 기존해석결과와 동일하였으나 3층 모델의 경우 $r_{sc} \geq 30\%$ 구간에서 반응수정계수가 기존 해석결과 대비 2.0으로 낮아진 것을 확인하였다.

이러한 영향들을 기존결과에 반영할 경우 상대적으로 장주기 모델인 4층 및 5층에 대해서는 모든 경우에 대해 2.5가 적절한 것으로 판단된다. 그러나 상대적으로 단주기 모델인 2층 및 3층에 대해서는 전단지배형 기둥의 변형연화 모델(Model 1) 및 재료강도 등의 영향 등으로 인해 적정 반응수정계수 및 반응수정계수가 감소하는 구간에 위치한 r_{sc} 의 값이 변동됨을 확



(a) Results of nonlinear static analysis (4F, $r_{sc}=30\%$, $0.8 V_p$)



(b) Modified and complemented R factors

Fig. 11. Influence of low material strength

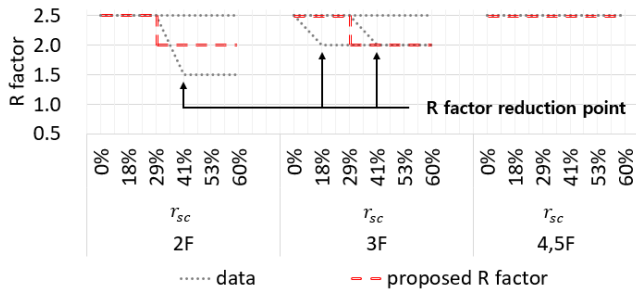


Fig. 12. R factors considering various effects

인하였다. 따라서 이를 종합적으로 고려한 적정 반응수정계수는 주기 T 및 r_{sc} 에 따라 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다.

4.5 최종 반응수정계수 제안

최종 반응수정계수는 4.3~4.4장의 선정결과 및 경향을 반영하여 Table 4와 같이 제안하였다. 제안 반응수정계수는 주기가 0.6초 이상인 경우 모든 경우에 대하여 2.5를 적용할 수 있으며, 주기가 0.4초 이하인 경우 r_{sc} 가 30% 미만일 때 2.5, 30% 이상일 때 2.0을 적용할 수 있다. 또한 주기가 0.4~0.6초 사이일 경우 주기에 따라 선형보간하여 적용한다. 단, 구조물의 주기는 조적허리벽의 영향을 고려하여 산정하여야 한다. 지진하중 산정 시 등가정적지진하중의 85%로 조정하되 주기상한계수를 이용하여 증가시키지 않은 원래의 약산식 주기 값에 따라 등가정적지진하중을 산정하였음에 유의한다.

$T_n \leq 0.4 \text{ sec}$ 인 건물은 3층 이하의 저층 건물에 해당되며 전단지배형 기둥의 모델링에 따른 R의 상향조정이 가능하지만(Fig. 10) 3층 건물의 경우에 낮은 재료강도의 영향을 고려하여(Fig. 11) $r_{sc} \geq 30\%$ 이면 R=2.0을 적용한다. 2층 건물 역시 Fig. 10에서 R=2.5가 허용되나 보수적인 모델을

Table 4. Proposed R factors for school buildings

Seismic force resisting system of school buildings		R factor
Non-seismic RC moment frames with partial masonry infills ¹⁾	$r_{sc} < 0.3$ or $T_n \geq 0.6 \text{ sec}$	2.5 ²⁾
	$r_{sc} \geq 0.3$ and $T_n \leq 0.4 \text{ sec}$	2.0 ²⁾

- 1) r_{sc} : Ratio of column controlled by shear classified as group iii for all columns in one story
 T_n : First mode fundamental period, including the effects of major non-structural materials
- 2) Linear interpolation with respect to T_n is applied between the values.
- 3) Seismic force using R shall not be lower than 85% of the equivalent lateral force based on approximate fundamental period.

적용 시 R=1.5까지 현저히 낮아짐을 고려하여(Fig. 6(b) 및 Fig. 7(b)) $r_{sc} \geq 30\%$ 인 경우에 R=2.0으로 3층과 통일된 값을 적용한 것이다.

5. 건축물 내진설계기준(안) 적용

앞서 4장에서 적용한 지반의 분류 및 증폭계수는 KBC 2016의 대표적인 지반을 선정하여 검토하였다. 여기서는 행정안전부 내진설계기준 공통 적용사항에 따라 건축물 내진설계기준 제정안에 도입 예정인 지반증폭계수를 적용하여 제안된 반응수정계수가 적절인지 확인한다.

5.1 지반조건별 설계스펙트럼 및 보정계수 비교

건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)의 지반증폭계수를 적용하여 제안된 반응수정계수를 검토하고자 Fig. 13(a)에 KBC 2016과 KDS 41 17 00(안)에 따른 설계스펙트럼을 비교하였다. 비교결과 $S_2(=S_{C,20\text{m미만}})$, $S_3(=S_{D,20\text{m미만}})$ 및 $S_4(=S_{D,20\text{m이상}})$ 지반의 경우 기존 KBC2016의 설계스펙트럼과 동일한 결과를 나타내었다. 그러나 $S_1(=S_B)$ 지반에서는 모서리 주기를 기준으로 짧은 주기에 대해 설계스펙트럼 가속도가 증가하였으며 장 주기에 대해서는 감소한 것으로 나타났다. 단, 기반암 깊이가 20 m 이상이고 평균전단파속도가 360 m/s 이상으로 분류되는 S_4 지반의 경우 규정된 지반증폭계수 F_v 의 80%를 적용하도록 되어있다. 이를 적용할 경우 설계스펙트럼이 Fig. 13(b)와 같이 변경되는 것으로 나타났다.

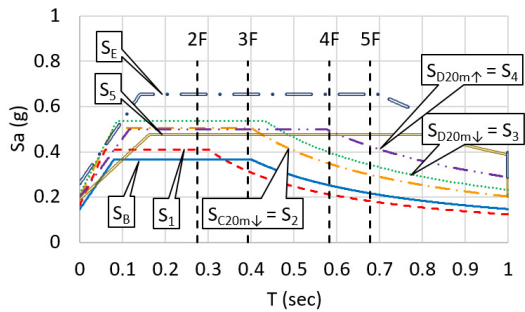
마찬가지로 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서도 응답스펙트럼 해석 시 등가정적 지진하중의 85% 수준이 되도록 보정계수 C_m 을 적용하였다. 이때 사용된 근사고유주기 약산식은 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)을 반영하여 식 (5)로 산정하였다.

$$T_a = C_i h_n^x \quad (5)$$

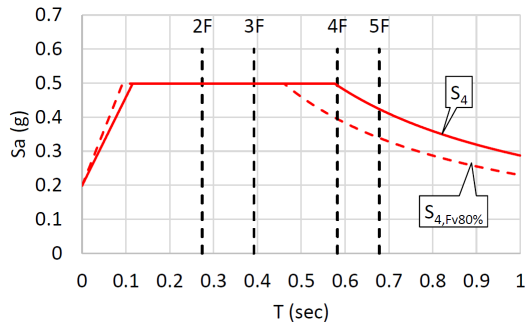
여기서, $C_i = 0.0466$, $x = 0.9$: 철근콘크리트모멘트골조

h_n : 건축물의 밑면으로부터 최상층까지의 전체 높이(m)

단, 강성에 영향을 줄 수 있는 비보강채움벽이 있는 철근콘크리트모멘트



(a) By standards (KBC2016, KDS 41 17 00 draft)



(b) By site amplification factor, Fv (S4)

Fig. 13. Comparison of design spectrum by site class

Table 5. Approximate period and C_m comparison by standard

Floor	Approximate period (sec)			C_m factor		
	KBC 2016	KDS 41 17 00	error	KBC 2016	KDS 41 17 00	error
5F	0.4193	0.4083	3%	1.59	1.61	2%
4F	0.3546	0.3340	6%	1.38	1.54	12%
3F	0.2858	0.2578	10%	1.04	1.36	30%
2F	0.2109	0.1790	15%	1.05	1.05	-

골조의 주기는 상기식에 2/3를 곱하여 산정한다.

KBC2016과 KDS 41 17 00의 기준으로 산정된 근사고유주기를 비교한 결과 Table 5와 같이 층수가 낮아질수록 최대 15%까지 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 보정계수 C_m 을 산정한 결과 Table 5와 같이 2층의 경우 1.05배로서 지진하중의 조정이 1.0에 근사하였으며 기존과 동일하다. 그러나 3층, 4층 및 5층의 경우 지반조건별 각각 최대 1.36, 1.54 및 1.61배로서 지진하중 조정이 KBC 2016 대비 상향조정된 것으로 나타났다. 특히 3층의 경우 보정계수가 최대 30%까지 증가한 것으로 나타났다. 이는 S_1 지반에서 해석모델로부터 산정된 고유치해석 주기는 가속도가 감소하는 구간에 위치한 반면 약산식으로부터 산정된 근사고유주기는 가속도가 일정한 구간에 위치하고 있어 그 차이가 크기 때문이다.

5.2 지반조건별 반응수정계수 유효성 검토

5.2.1 검토대상 선정

KDS 41 17 00(안)의 지반증폭계수에 따라 기존 지반조건과 차이가 나타나는 S_1 지반과 기존 조건에서 검토되지 않았던 $S_2(=S_{C,20m \text{ 미반}})$, $S_4(=$

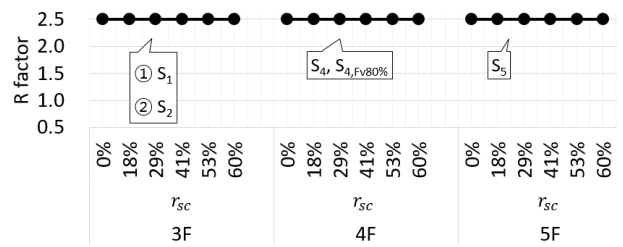


Fig. 14. R factor results according to site class

$S_{D,20m \text{ 이상}}$ 및 S_5 지반을 선정하였다.

각 지반조건별 검토 대상은 1차 모드에 해당되는 스펙트럼 가속도가 기존 해석 조건인 S_B 지반 및 $S_{D,20m \downarrow}$ 지반의 설계스펙트럼 범위 밖에 있는 건물 중에서 모서리주기(가속도 일정구간과 속도 일정 구간의 경계)와 가장 근사한 주기를 갖는 모델로 선정하였다. 따라서 S_1 , S_4 및 S_5 지반에 대해 3층, 4층 및 5층 모델을 검토하였다. 비록 S_2 지반은 설계스펙트럼이 S_B 지반 및 $S_{D,20m \downarrow}$ 지반의 설계스펙트럼 범위 내에 있어서 제한된 반응수정계수에 큰 변화가 없을 것으로 예상되나 모서리주기에 가장 근사한 주기를 갖는 3층 모델을 선정하여 검토하였다. 기반암 깊이가 20m 이상이고 평균전단파속도가 360 m/s 이상으로 분류되어 규정된 지반증폭계수 F_v 의 80%를 적용할 수 있는 S_4 지반의 경우에 일반 S_4 지반과 비교하기 위하여 동일한 4층 모델을 검토대상으로 선정하였다.

5.2.2 반응수정계수 검토결과

선정된 일부 조건에 대하여 KDS 41 17 00(안)에 따라 개정된 지반증폭계수를 적용하여 반응수정계수를 검토한 결과 Fig. 14와 같이 모든 검토대상에서 반응수정계수 2.5가 선정되었다. 이는 Table 4에서 제시된 반응수정계수가 KDS 41 17 00에 따른 선정결과 대비 동일하거나 또는 보수적임을 나타내며, 본 연구에서 제한한 반응수정계수가 KDS 41 17 00에서도 유효함을 의미한다.

6. 결론

본 연구에서는 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼의 선형해석평가법과 비선형정적해석법을 3차원 해석모델에 적용하고 그 결과를 비교하여 조적허리벽이 있는 비내진 철근콘크리트모멘트골조의 적정 반응수정계수를 제안하였다. 건물의 고유주기와 전단지배형 기둥의 비율 및 전단강도수준에 따라 분류된 다양한 해석조건을 적용하였다. 이 연구의 주요 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 비선형해석결과에 상응하는 선형해석평가를 얻기 위한 조적허리벽이 있는 비내진 철근콘크리트모멘트골조의 반응수정계수는 층수가 높아질수록 증가하고 증가하는 경향이 나타났다. 이는 등가정적 지진하중에 기초한 지진하중의 보정계수가 커지기 때문인 것으로 나타났다.
- 2) 전단지배형 기둥의 비율이 높아질수록 반응수정계수가 낮아지는 경향이 나타났다. 반응수정계수의 변화가 나타나는 전단지배형 기둥의 비율은 전체의 약 30% 정도로 나타났으며, 이는 대략적으로 표준적인 평면

의 학교건물에서 장변방향 한 면의 기둥이 모두 전단지배형인 경우에 가
 잡다.

- 3) 다수의 조건에 대한 선정결과를 바탕으로 반응수정계수를 주기가 0.6초 이상인 경우 모든 경우에 대해 2.5, 0.4초 이하인 경우 r_{sc} 가 30% 미만일 때 2.5, 이상일 때 2.0으로 제안하였다. 또한 주기가 0.4-0.6초 사이일 경우 주기에 따라 반응수정계수를 선형보간 한다.
- 4) 일부 해석조건에 대하여 KDS 41 17 00(안)의 지반조건 및 주기약산식을 적용하여 반응수정계수를 검토한 결과 제안된 반응수정계수는 다소 안전측의 값을 확인하였다.
- 5) 제안된 반응수정계수는 구조물의 고유주기 및 전단지배형 기둥의 비율을 고려하는 것이 특징이다. 이와 같이 추가적인 조건을 부여함으로써 학교시설의 구조적 특수성을 고려하되 지나치게 보수적인 평가가 이루어지지 않도록 하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1D1A1B03034614).

/ REFERENCES /

- 1. Ministry of Education, School Facilities Seismic Design Standard Amendment Bill, c2018.
- 2. Ministry of Education, Seismic performance evaluation and retrofit manual for school facilities, c2018.
- 3. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code 2016, 2016.
- 4. Woo KS, Park SS, A Study on Seismic Performance of a RC Moment

- Frame Building, Architectural Institute of Korea J, 2008 Aug; 24(8):13-20.
- 5. Jeong WJ, Song HS, Study on the Response Modification Factor for Dual-frame Systems with Intermediate Moment Frames, Architectural Institute of Korea J, 2011;31(2):89-90.
- 6. Han SW, Oh YH, LH, Investigation on Response Modification Factor of RC Structural Walls in Apartment Buildings, Journal of the Korea Concrete Institute, 2001 Oct;13(6):544-552.
- 7. Han AR, Kim TW, Yu EJ, Proposition of Response Modification Factor of Low-rise Steel Intermediate Moment Frame in Korea using FEMA P695, EESK J, Earthquake Eng. 2014 Nov;18(1):37-43.
- 8. FEMA P695, Quantification of Building Seismic Performance Factors, Federal Emergency Management Agency, c2009.
- 9. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code 2009, 2009.
- 10. Kang CK, Choi BJ, New Approach to Evaluate the Response Modification Factors for Steel Moment Resisting Frames, International of Steel Structures J, 2011;11(3):275-286.
- 11. Abdollahzadeh Gh, Banihashemi MR, Elkaee S, Esmaeelnia Amiri M, Response Modification Factor of Dual Moment-resistant Frame with Buckling Restrained Brace (BRB), Steel and Composite Structures J, 2013;14(6):621-636.
- 12. Fanaie N, Shamloua SO, Response modification factor of mixed structures, Steel and Composite Structures J, 2015;19(6):1449-1466.
- 13. Kim BS, Park JH, Response Modification Factors for Seismic Performance Evaluation of Non-seismic School Buildings with Partial Masonry Infills, EESK J, Earthquake Eng. 2019 Jan;23(1):71-82.
- 14. Elwood, K, J. Jack P, Moehle, Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames, c2004.

/ APPENDIX /

Table A1. Structural characteristics of school facilities from surveys

Story	f _{ck} (MPa)	f _y (MPa)	Column section			Height (m)	Span (m)
			Front	Center	Rear		
3F	18	300	400x450 (8-D19, D10@300)	400x450 (8-D19, D10@300)	400x400 (6-D19, D10@300)	3.5	4.5
	21	300	350x500 (8-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	3.6	4.5
	18	400	500x600 (12-D22, D10@300)	500x500 (12-D22, D10@300)	500x600 (12-D22, D10@300)	3.6	4.5
	18	300	350x500 (8-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	3.3	4.5
	21	400	400x500 (14-D22, D10@300)	400x500 (14-D22, D10@300)	400x500 (14-D22, D10@300)	3.3	4.5
4F	18	240	350x500 (6-D19, D10@300)	350x350 (-)	350x400 (4-D19, D10@250)	3.1	4.5
	21	300	350x500 (10-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	3.3	4.5
	21	300	350x500 (8-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	350x400 (8-D16, D10@300)	3.3	4.5
	21	400	350x500 (10-D19, D10@150)	350x450 (-)	350x500 (-)	3.3	4.5
	15	240	400x500 (10-D19, D10@300)	400x400 (10-D19, D10@150)	400x400 (8-D19, D10@300)	3.3	4.5
5F	21	300	400x500 (10-D19, D10@300)	400x400 (8-D19, D10@300)	400x400 (12-D19, D10@300)	3.3	4.5
	21	300	350x400 (8-D19, D10@300)	350x400 (10-D19, D10@300)	350x400 (8-D19, D10@300)	3.3	4.5
	18	300	360x700 (10-D19, D10@300)	400x400 (10-D19, D10@300)	360x700 (10-D19, D10@300)	3.3	5.0
	21	300	350x500 (12-D19, D10@300)	350x500 (10-D19, D10@300)	350x450 (8-D19, D10@300)	3.4	4.5
	21	300	350x500 (10-D22, D10@300)	350x450 (8-D19, D10@300)	350x450 (8-D19, D10@300)	3.5	4.5

Table A2. Structural characteristics of 3-dimensional structural models

Story	f _{ck} (MPa)	f _y (MPa)	Column section			Beam section			Height (m)	Span (m)	weight (kN)	Approximate period (sec)	Fundamental period (sec)
			Front	Center	Rear	Longitudinal direction	Transverse direction						
							Classroom	Hall					
2F	18	300	400x450 (8-D19, D10@300)	400x450 (8-D19, D10@300)	400x400 (6-D19, D10@300)	300x500 (3/2-D19, 2-D10@200)	300x600 (6/3-D19, 2-D10@150)	300x450 (3/2-D19, 2-D10@300)	7.0 (3.5x2)	72.0 (4.5x16)	16,818	0.2331	0.2742
3F							10.5 (3.5x3)	24,286	0.3060		0.3923		
4F	21	300	350x500 (10-D19, D10@300)	350x450 (8-D19, D10@300)	350x450 (8-D19, D10@300)		350x600 (6/2-D19, 2-D10@200)	300x450 (3/2-D19, 2-D10@300)	13.5 (3.5x4)		30,613	0.3735	0.5828
5F			350x500 (10-D22, D10@300)	350x450 (8-D19, D10@300)	350x450 (8-D19, D10@300)		300x600 (5/2-D19, 2-D10@200)	300x450 (4/2-D19, 2-D10@250)	17.5 (3.5x5)		38,334	0.4371	0.6783