

5층 철근콘크리트 모멘트-저항골조 구조물의 내진성능 평가 및 공사원가 분석

Seismic Performance Evaluation and Economic Analysis of 5-Story RC Moment-Resisting Frames

강 석 봉

김 성 대

박 의 수

오 상 묵

손 기 영*

Kang, Suk-Bong

Kim, Sungdae

Park Eu-Su

Oh Sangmuk

Son, Kiyoung*

School of Architectural Engineering, University of Ulsan, 93, Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan, 680-749, Korea

Abstract

Recently, the concept of seismic design has changed from prescriptive to performance based design. For the performance based design with the specified target performance of the structure, it is necessary to execute the inelastic structural analysis to predict precisely the actual behavior of the structure. To address this issue, the seismic performance of the 5-story RC moment-resisting frames designed in accordance with KBC2009 is evaluated through push-over analysis and economic analysis is conducted focused on the direct construction costs. The results show that the ordinary and the intermediate moment-resisting frame are evaluated to meet the required performance design criteria and that the direct construction costs of the two frames are similar. However, although the special moment-resisting frame designed with strong column-weak girder philosophy satisfies the required performance design criteria, the direct construction cost is uneconomical compared with other frames. Therefore, although the intermediate moment-resisting frame of design category D is prohibited in IBC2012, the ordinary and the intermediate moment-resisting frame are estimated to be more reasonable than the special moment-resisting frame for the design of 5-story RC moment-resisting frame.

Keywords : RC moment resisting frame, seismic performance, performance point, economic analysis, cost estimation

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

국내에서도 잦은 지진 발생으로 내진설계의 중요성이 부각되고 있는 가운데 구조물 내진설계에 대한 개념이 사양중심설계에서 성능기반설계로 변화하고 있다. 성능기반설계는 구조물 목표성능을 직접 부여하는 방법으로 보다 경제적이고 합리적인 방법으로 평가되며 이를 위해서는 구조물의 실

제 거동을 정확히 예측하기 위한 비탄성 구조해석이 필요하다. 비탄성 정적해석인 푸쉬오버해석은 재료 인성과 구조물 부정정성을 고려하여 구조물 비탄성 거동을 파악할 수 있어 최근 실무에서도 많이 적용되고 있다.

KBC2009[1]에서는 철근콘크리트 모멘트-저항골조에서 기존의 보통모멘트골조 및 중간모멘트골조에 특수모멘트골조가 추가되었다. 철근콘크리트 내진설계범주 D 구조물에 대한 보통모멘트골조의 적용이 제한되어 실무에서는 시스템 제한과 높이 제한이 없는 중간모멘트골조 적용이 늘어나고 있는 실정이다. 그러나 IBC2012[2]에서는 내진설계범주 D의 구조물에 중간모멘트골조 적용을 제한하고 있어 특수모멘트골조 적용도 검토해 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 등가정적해석법에 의하여 설계되는 내진설계범주 A, B를 제외

Received : July 6, 2015

Revision received : July 28, 2015

Accepted : August 13, 2015

* Corresponding author : Son, Kiyoung

[Tel: 82-52-259-2788, E-mail: sky9852111@ulsan.ac.kr]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

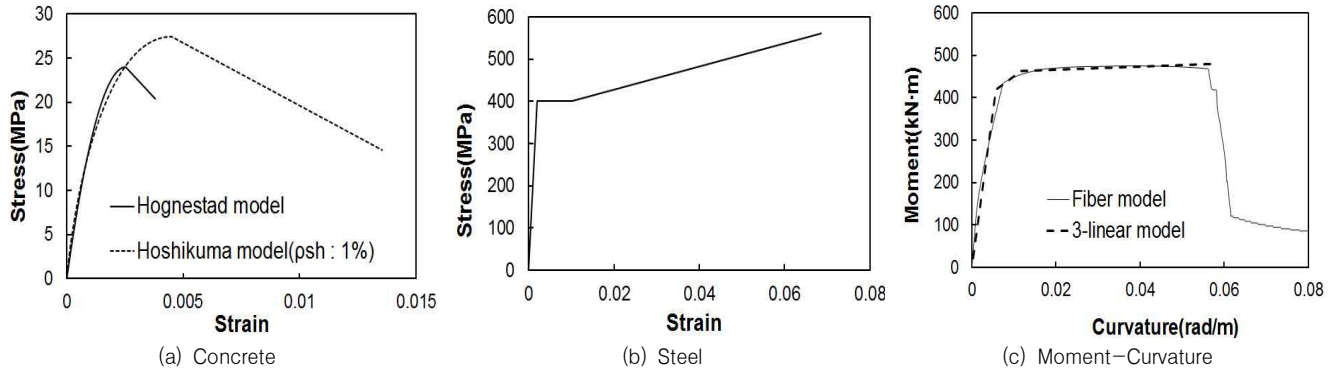


Figure 1. Fiber model

하고 동적해석법이 요구되는 내진설계범주 C, D에 대한 철근콘크리트 보통, 중간 및 특수모멘트골조 구조물을 설계한 후 푸쉬오버해석을 실시하여 내진성능을 평가하고 구조물의 직접공사비를 비교하여 경제성을 평가하고자 한다. 본 연구를 통해 일반적으로 미국의 강진지역에 적용하는 특수모멘트골조에 대해 중·약진 지역인 국내 적용 가능성을 확인하고 시공성 및 경제성을 고려하여 유리한 지진력저항시스템을 선정하는데 활용될 것으로 기대된다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구의 방법은 다음과 같다. 첫째, 내진설계범주 C, D에 대한 철근콘크리트 모멘트-저항골조 시스템의 보통, 중간 및 특수모멘트골조를 적용하여 예제구조물을 설계한다. 둘째, 비탄성 정적해석을 통해 예제구조물의 내진성능을 평가한다. 셋째, ATC-40의 역량스펙트럼법을 이용한 성능점을 구하여 성능목표의 달성 여부를 확인한다. 넷째, 예제구조물의 직접공사비를 산정하고 경제성을 평가한다.

통계청에 따르면 2014년도 기준으로 전국 건축물중 5층 이하 건축물이 97.2%로 대부분을 차지하고 있다. 또한 6층 이상 구조물은 전단벽을 사용하기 때문에 본 연구에서는 5층 높이의 예제구조물을 설계하였다. 그리고 FEMA356의 ‘Damage Control and Building Performance Levels’의 Drift 기준을 이용하여 KBC2015 개정안의 성능목표를 확인하는 것으로 한정한다. 또한, 직접공사비를 산정하기 위하여 현재 실무에서 활용하고 있는 적산프로그램을 활용하였으며 거푸집 공사 및 콘크리트 공사의 작업 난이도는 모든 구조물에서 동일하다고 가정한다.

2. 비탄성 해석모델

2.1 Fiber Model

Fiber Model은 단면을 다수의 Fiber 요소로 나누고 각 Fiber에 재료 수직응력-수직변형률 관계를 적용함으로써 단면 휨모멘트-곡률 관계를 유도할 수 있다.

외부콘크리트에 Modified Hognestad Model과 내부콘크리트에 Hoshikuma Model을 적용하여 횡방향 철근 구속 효과를 고려하였으며 콘크리트 수직응력-수직변형률 관계는 Figure 1(a)에 나타내었다. 또한, 철근은 탄성계수 1%의 소성경화를 고려하여 Figure 1(b)와 같이 단순화하였으며 비선형 휨모멘트-곡률 관계를 적용할 경우 오버슈팅 문제가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 삼선형으로 단순화하여 Figure 1(c)에 나타내었다.

2.2 유연도 선형분포 모델

하나의 부재를 다수의 요소로 나타내었으며 한 요소의 양단과 변곡점 사이에서 유연도가 선형으로 분포한다고 가정하는 유연도 선형분포 모델을 적용하여 부재 비탄성 강성도 행렬을 유도하였다. 부재를 이루는 요소 개수에 따라 오차 및 해석시간이 변하므로 선형연구[3]을 통해 산정한 적정 요소 개수를 해석에 적용하였다.

3. 구조물설계

3.1 설계 개요

철근콘크리트 보통(Ordinary moment-resisting frame, OMRF), 중간(Intermediate moment-resisting frame, IMRF), 및 특수모멘트골조(Special moment-resisting

frame, SMRF)를 적용하여 설계된 예제구조물에 대해 자체 개발한 비탄성 정적 및 동적 구조해석 프로그램(ISAAC-3D)을 이용하여 푸쉬오버해석을 수행하였다.

초기하중은 FEMA356을 참고하여 고정하중 100%, 적재하중 25%의 중력하중을 고려하였다. Table 1은 본 연구에 적용된 설계사항을 나타낸다. 중력방향 하중으로 고정하중 5.0kN/m^2 , 적재하중 2.5kN/m^2 을 고려하였다. 또한, 풍하중 산정을 위해서 기본풍속 35m/sec , 노풍도 B, 중요도 계수 1.0을 적용하였다.

Table 1. Design parameters

Design details	Content		
Seismic force resisting system	Reinforced concrete moment-resisting frame system		
Seismic zone	1 (Site coefficient $A=0.22$)		
Seismic use group	I rating (Importance factor $I_e = 1.2$)		
System type	Ordinary	Intermediate	Special
R	3	5	8
Ω_0	3	3	3
C_d	2.5	4.5	5.5
Fundamental period	$T_a = C_T T_n^{3/4}$ RCMRF ($C_T = 0.073$)		
Building height, width	5 Floor : 20m, Width: 36m x 19.8m		

3.2 구조물 개요

본 연구의 예제구조물은 Table 2과 같이 KBC2009 건축구조설계기준[1]과 콘크리트구조설계기준[4]를 참고하여 5층 업무시설 용도로 지반종류 S_B 내진설계범주 C의 보통 및 중간모멘트골조 구조물, 지반종류 S_D 내진설계범주 D의 중간 및 특수모멘트골조 구조물을 구조설계 하였다. 중간 및 특수모멘트골조는 KBC2009 내진설계 시 특별 고려사항을 반영하여 구조설계를 실시하였다.

Table 2. Overview of building

Design code	KBC2009 KCI2012		
Story (height)	5 (20m)		
Floor height	4m		
Type	Office building		
Material	Reinforced concrete		
Strength	Concrete	$F_{ck} = 24\text{MPa}$	
	Reinforcement	$F_y = 400\text{MPa}$	

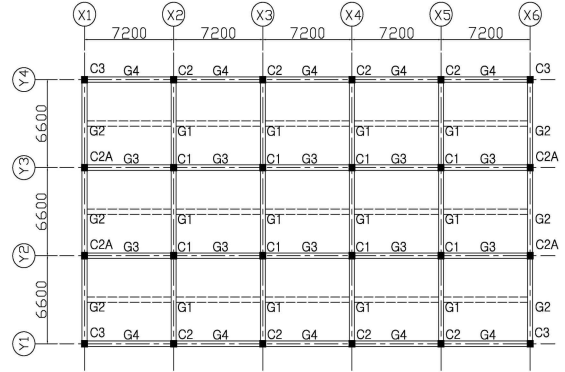


Figure 2. Floor plan

건물 구조계획은 다음 Figure 2와 같이 기본경간은 장변이 7.2m 5경간, 단변이 6.6m 3경간으로 직사각형 형태로 계획하였으며 구조물 층고는 동일하게 4m로 계획하였다. 예제구조물의 부재설계는 MIDAS GEN을 이용하여 실시하였으며 주요 구조부재에 대한 구조설계 결과를 Table 3, 4, 5, 6에 나타내었다.

Table 3. Structural design results (Category C, OMRF)

System		Ordinary moment-resisting frame			
Member	Story	Dimensions (mm)		Reinforcement	Stirrup
Beam (end)	1-5	G1	400 × 600	Top	8-D22
				Bottom	3-D22
		G2	Top	7-D22	
			Bottom	4-D22	
		G3	Top	7-D22	
			Bottom	3-D22	
		G4	Top	7-D22	
			Bottom	4-D22	
Column	1	500 × 500	C1	14-D25	2-D10@200
			C2	10-D25	
			C2A	8-D25	
	2-5	500 × 500	C3	8-D25	
			C1	6-D25	
			C2A	6-D25	

Table 4. Structural design results (Category C, IMRF)

System		Intermediate moment-resisting frame			
Member	Story	Dimensions (mm)		Reinforcement	Stirrup
Beam (end)	1-5	G1	400 × 600	Top	8-D19
				Bottom	3-D19
		G2	Top	5-D19	
			Bottom	3-D19	
		G3	Top	6-D19	
			Bottom	3-D19	
		G4	Top	4-D19	
			Bottom	3-D19	
Column	1-5	500 × 500	C1	8-D22	2-D10@150 (end)
			C2		
			C2A		
			C3		

Table 5. Structural design results (Category D, IMRF)

System		Intermediate moment-resisting frame				
Member	Story	Dimensions (mm)		Reinforcement	Stirrup	
Beam (end)	1-5	G1	400 × 600	Top	11-D19	2-D10@100
				Bottom	4-D19	
		G2	600	Top	9-D19	
				Bottom	6-D19	
		G3	300 × 600	Top	8-D19	
				Bottom	3-D19	
		G4	600	Top	7-D19	
				Bottom	4-D19	
Column	1	C1, C2, C2A, C3	500 × 500	16-D22		2-D10@150 (end)
				12-D22		
				10-D22		
				8-D22		
	2-5	C1, C2, C2A, C3	500 × 500	16-D22		
				12-D22		
				10-D22		
				8-D22		

Table 6. Structural design results (Category D SMRF)

System		Special moment-resisting frame				
Member	Story	Dimensions (mm)		Reinforcement	Stirrup	
Beam (end)	1-5	G1	400 × 600	Top	6-D22	2-D13@125
				Bottom	3-D22	
		G2	600	Top	4-D22	
				Bottom	3-D22	
		G3	600	Top	4-D22	
				Bottom	3-D22	
		G4	600	Top	4-D22	
				Bottom	3-D22	
Column	1-5	C1, C2, C2A, C3	600 × 600	18-D22		3-D13@100 (end)
				14-D22		
				12-D22		
				8-D22		
	1-3	C1, C2, C2A, C3	550 × 550	14-D22		
				12-D22		
				8-D22		
				8-D22		
4-5	C1, C2, C2A, C3	550 × 550	8-D22			
			8-D22			
			8-D22			
			8-D22			

4. 구조해석

철근콘크리트 모멘트-저항골조 시스템의 예제구조물에 대해 보-기둥 접합부를 강체로 가정하고 자체 개발된 비탄성 정적 및 동적 구조해석 프로그램(ISAAC)을 이용하여 푸쉬오버해석을 수행하였다. FEMA356을 참고하여 초기하중으로 고정하중 100%, 적재하중 25%의 중력하중을 고려하였으며 예제구조물을 내, 외부골조를 모두 고려하고 슬래브 강체 다이어프램을 고려하여 강체트러스를 이용한 연결골조로 나타내었다. 초기하중으로 중력하중이 적용된 상태에서 KBC2009 황하중에 대해 푸쉬오버구조해석을 수행하였다. 각 골조의 명칭은 Table 7과 같이 정의하였다.

Table 7. Notation for frame

Type	Notation	Content
① Moment-resisting frame	O	Special moment frame
	- C	Intermediate moment frame
	5	Ordinary moment frame
② Earthquake design category	①	Earthquake design category C
	②	Earthquake design category D
③ Story	5	5-story

4.1 설계계수

KBC2009에서 설계계수는 반응수정계수 (Response modification coefficient, R), 시스템초과강도계수 (System overstrength factor, ω_0) 및 변위증폭계수(Displacement amplification factor, C_d)로 구성되어 있다. 구조물의 반응수정계수는 설계밀면전단력에 대한 탄성구조물에서 예상되는 밀면전단력 비로 구조물의 비탄성 변형과 에너지 흡수 능력을 나타내는 척도가 된다. 시스템초과강도계수는 설계하중과 구조물 강도의 비이며 변위증폭계수는 설계하중에 대한 탄성변위와 비선형거동으로 예상되는 비탄성 변위의 비이다. Table 8에 철근콘크리트 모멘트-저항골조 시스템의 설계계수가 제시되어 있다.

Table 8. Design coefficient (RC Moment-resisting frame)

System	Design coefficient	ω_0	C_d	R
RC SMRF		3	5.5	8
RC IMRF		3	4.5	5
RC OMRF		3	2.5	3

반응수정계수는 일반적으로 설계강도(V_D)와 보유강도(V_Y)의 비인 강도계수(R_s), 항복변위(ΔY)와 최대변위(ΔU)의 비인 연성계수(R_w)의 곱으로 나타낼 수 있다[5].

본 연구에서는 Figure 3과 같이 구조물 한계상태까지의 밀면전단력-지붕층변위 관계를 등가에너지개념을 적용해 이선형으로 이상화하여 강도계수(R_s)와 연성계수(R_w)를 산정하였다.

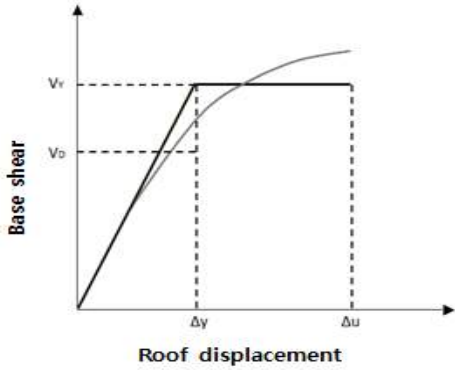
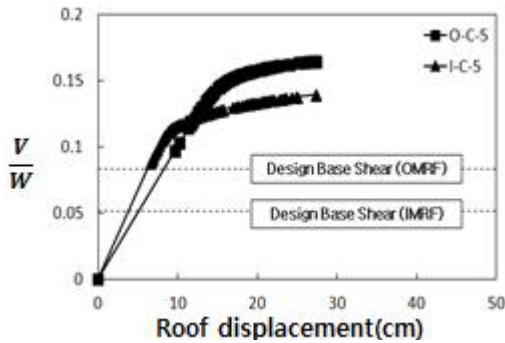
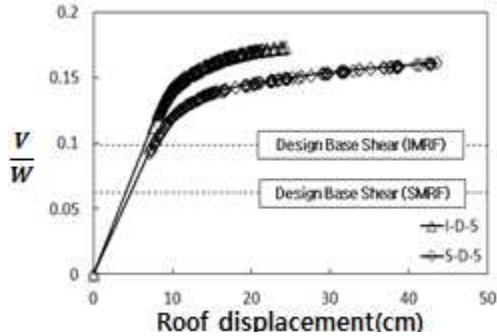


Figure 3. Response modification coefficient (R)

Figure 4는 내진설계범주 C 및 D 구조물에 대한 한계상태까지의 푸쉬오버해석 결과이며 V/W 는 유효건물중량(W)에 대한 밀면전단력(V)의 비이다[6,7].



(a) Earthquake design category C



(b) Earthquake design category D

Figure 4. Base shear - Roof displacement

KBC2009의 황하중 형태에 대하여 내진설계범주 C에서는 O-C-5가 I-C-5보다 강성도는 작지만 강도는 크게 평가되었다. 철근콘크리트 보통모멘트골조인 경우 반응수정계수 3으로 설계하여 중간모멘트골조 보다 큰 강도를 보였다. 내진설계범주 D에서는 I-D-5가 S-D-5보다 강성도와 강

도가 크게 평가되었다. 반응수정계수 8에 대하여 설계한 철근콘크리트 특수모멘트골조는 작은 설계지진력으로 강도는 중간모멘트골조 보다 작으나 강기동-약보 개념과 주요 구조 부재에 대한 다양한 철근상세로 인하여 연성도는 I-D-5보다 1.68배 더 크게 나타났다. 특수모멘트골조는 보통 및 중간모멘트골조 보다 큰 반응수정계수를 적용하기 때문에 설계밀면전단력은 작지만 골조와 보-기둥 접합부에 특별내진상세를 적용한다. 푸쉬오버해석 결과를 보면 보통 및 중간모멘트골조는 보-기둥 접합부에서 소성힌지가 2, 3층에 집중적으로 발생한 반면 특수모멘트골조는 전 층에 걸쳐 발생하여 구조물의 연성도가 상대적으로 크다.

Table 9에 모멘트-저항골조에 따라 산정한 예제구조물의 강도계수, 연성계수 및 반응수정계수를 나타내었다. 반응수정계수는 O-C-5에서 3.33으로 KBC2009의 3보다 크고 I-C-5에서 7.89로 KBC2009의 5보다 크게 나왔다. IBC2012에서 적용을 제한하고 있는 내진설계범주 D 철근콘크리트 중간모멘트골조의 반응수정계수는 3.95로 KBC2009의 5보다 작았다. 특수모멘트골조인 S-D-5는 KBC2009 반응수정계수인 8 보다 큰 9.18을 나타내었다. 내진상세를 고려하지 않는 O-C-5의 경우 기둥에 변형이 집중되어 한계상태에 빨리 도달하는 반면 특수모멘트골조는 내진상세로 인하여 상층부까지 변형이 분산되어 연성계수 및 강도계수가 크게 평가되었다.

Table 9. Design coefficients (example structure)

Design coefficient		Design coefficient		
		Ω_0	C_d	R
System	OMRF	1.90	1.76	3.33
	IMRF	2.77	2.85	7.89
Category C	IMRF	1.76	2.25	3.95
	SMRF	2.39	3.85	9.18

4.2 성능점

KBC2015 개정안에 따르면 지진력저항시스템을 성능설계법으로 설계하는 경우 최소목표성능을 만족하게 되어있다. 목표성능에는 즉시거주(Immediate Occupancy, I·O), 인명안전(Life Safety, L·S) 및 붕괴방지(Collapse Prevention, C·P)가 있으며 내진 I 등급의 건축물은 최소한 인명안전을 만족하도록 하고 있다. 목표성능은 성능수준기준에 해당하는 층간변위일 때 지붕층 변위로서 각 구조물마다 기준에 해당하는 층간변위에 도달할 때의 지붕층 변위를 나타낸 것이다.

FEMA356에서는 구조시스템에 따라 ‘Damage Control and Building Performance Levels’의 Drift 기준과 부재별 Acceptance Criteria를 이용하여 성능수준을 판단하도록 되어있다[8]. Table 10에 층간변위에 따른 성능수준기준을 나타내었다. 부재 성능수준기준인 Acceptance Criteria는 해당 성능수준에 도달한 구조부재 수의 비를 이용하여 목표성능수준 만족 여부를 판단하도록 하고 있으나 구체적인 비율이 제시되어 있지 않으므로 구조물 층간변위를 이용하여 성능수준을 판단하였다.

Table 10. Performance level (FEMA356 - Drift)

Performance level	(unit : %)		
	I·O	L·S	C·P
Structural system			
Concrete frame	1.0	2.0	4.0
Concrete Walls	0.5	1.0	2.0
Steel moment frames	0.7	2.5	5.0
Braced steel frames	0.5	1.5	2.0

Figure 5에 역량스펙트럼법을 이용하여 성능점을 산정하는 방법을 나타내었다[9]. 역량스펙트럼법에서는 밀면전단력-지붕층변위를 역량스펙트럼으로 변환하고 탄성설계스펙트럼을 감쇠비를 이용하여 비탄성스펙트럼으로 변환한 후 비탄성스펙트럼과 역량스펙트럼이 교차하는 점을 성능점으로 정의한다.

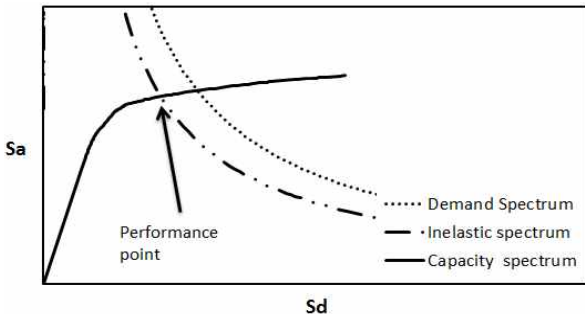
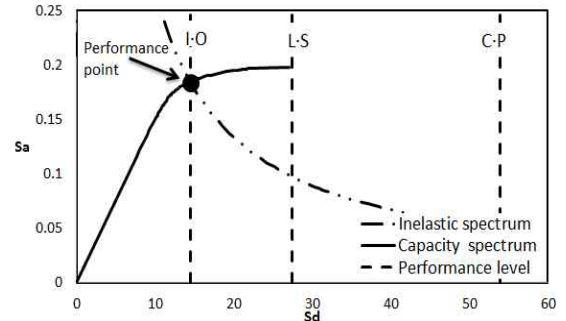


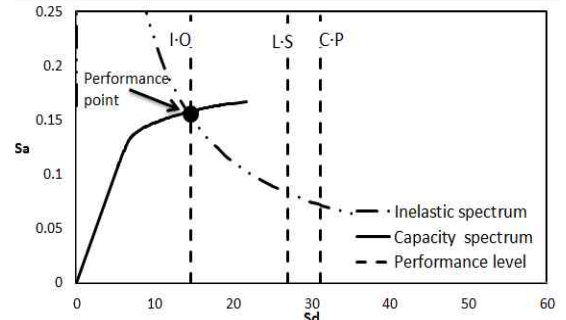
Figure 5. Capacity spectrum method

Figure 6에 각 구조물의 성능점을 나타내었으며 Table 10의 성능수준 층간변위가 발생하는 지붕층 변위를 I·O, L·S, C·P로 표시하였다. 비탄성 요구스펙트럼은 재현주기 2400년의 2/3 수준 설계스펙트럼을 활용하여 구하였다. 구조물 성능점에서의 지붕층변위는 O-C-5의 경우 14.7cm, I-C-5의 경우 14.3cm, I-D-5의 경우 11.6cm, S-D-5의

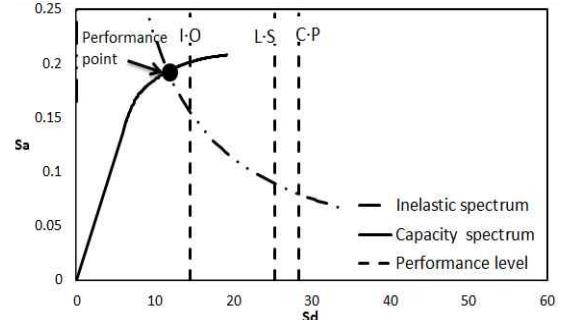
경우 13.1cm으로 확인되었다. FEMA356 기준을 이용하여 각 구조물의 성능수준을 확인한 결과 O-C-5는 인명안전 그리고 I-C-5, I-D-5 및 S-D-5는 즉시거주 수준으로 나타났다. KBC2015 개정안에 따르면 중요도 I의 성능목표는 인명안전이므로 모든 구조물은 성능목표를 만족하였다.



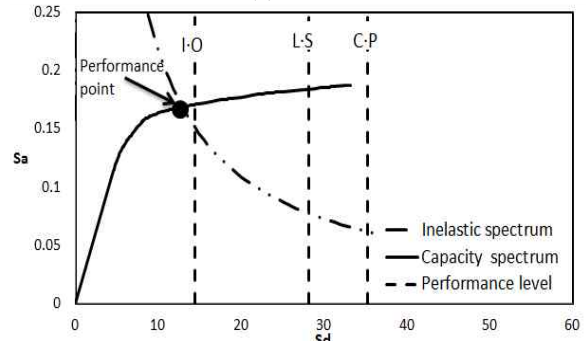
(a) O-C-5



(b) I-C-5



(c) I-D-5



(d) S-D-5

Figure 6. Performance point

5. 경제성 분석

5.1 가정 사항

직접공사비를 산정하기 위해서 본 연구에서는 (주)OO전산의 EMS(통합내역관리) 시스템을 활용하였으며 기둥 및 보 내진상세 적용으로 인한 작업 난이도를 고려하기 위하여 I-D-5와 S-D-5의 기둥 및 보의 철근가공 조립 난이도를 O-C-5와 I-C-5보다 복잡한 것으로 가정하였다. 또한, 자재단가는 2015년 04월 가격정보, 물가자료, 유통물가, 거래가격 중 최저가를 기준으로 거푸집, 철근 및 콘크리트의 자재비를 산정하였다. 노무비의 경우, “2015년 건설공사 표준품셈”의 6-3-4를 토대로 거푸집공사는 철근콘크리트 벽식 구조를 기준한 유로폼을 모든 구조물에서 동일하게 사용한다고 가정하였다[10]. 콘크리트의 경우, 2015년 상반기 표준시장단가의 “콘크리트 펌프카를 사용한 콘크리트 타설” 실적공사비 단가를 적용하여 모든 구조물에서 동일한 콘크리트를 사용한다고 가정하였다. 이 때, 노무비 단가는 “2015년 상반기 적용 건설업 임금실태조사보고서(시중노임 단가)”의 금액을 적용하였다[11,12].

5.2 물량산출

본 연구에서는 자재비, 노무비 및 기계경비의 직접공사비만 산출하고 직접공사비의 비율로 정해지는 재경비는 공사비 분석에서 제외하였다. Table 11에 예제구조물에 대하여 산출된 물량을 나타내었다. 첫째, 철근물량의 경우, 내진설계범주 C에서는 I-C-5가 O-C-5보다 물량이 많이 산출되었으며 내진설계범주 D에서는 I-D-5보다 S-D-5에서 물량이 많이 산출되었다. 둘째, 거푸집 물량의 경우는 다른 골조에서는 동일하게 산출되었지만 S-D-5에서 거푸집 량이 약 120m² 정도 크게 산출되었다. 셋째, 콘크리트 수량은 내진설계범주 C, D의 중간모멘트골조에서 가장 적게 산출되었다.

5.3 직접공사비

자재비의 경우, Table 12와 같이 I-C-5의 자재비에 비하여 O-C-5는 4%, I-D-5는 2%, S-D-5는 9.3% 높게 나타났으며 이는 철근물량에 따른 차이로 분석되었다.

Table 11. Quantity take-off

Work	System	O-C-5	I-C-5	I-D-5	S-D-5
		Column	18.7	17.6	19.1
Reinforcement (ton)	Beam	55.7	44.5	51.7	59.8
	Others	94.0	94.0	94.0	94.0
	Total	168.4	156.2	164.8	187.0
	Column	924.0	924.0	924.0	1,047.2
Form (m ²)	Beam	1,583.1	1,583.1	1,583.1	1,583.1
	Others	4,072.9	4,072.9	4,072.9	4,072.9
	Total	6,580.0	6,580.0	6,580.0	6,703.2
	Column	115.5	115.5	115.5	148.6
Concrete (m ³)	Beam	316.6	262.2	262.2	316.6
	Others	919.7	919.7	919.7	919.7
	Total	1,351.8	1,297.3	1,297.3	1,384.9

Table 12. Material cost

Work	System	O-C-5	I-C-5	I-D-5	S-D-5
		Scrap iron(ton/1,000 won)	5.24 / 2,042	4.83 / 1,882	5.10 / 1,987
Reinforcement (ton/1,000won)	HD10	54.69 / 41,839	58.64 / 44,857	59.42 / 45,453	45.04 / 34,453
	HD13	2.50 / 1,884	2.50 / 1,884	2.50 / 1,884	31.65 / 1,884
	HD19		33.13 / 24,847	39.73 / 89,800	
	HD22	99.68 / 74,757	66.69 / 50,018	68.19 / 51,145	116.07 / 87,050
	HD25	17.73 / 13,293			
	Ready mixed concrete (m ³ /1,000won)	25-18-08	37 / 1,864	37 / 1,864	37 / 1,864
	25-24-12	1,366 / 78,594	1,311 / 75,429	1,311 / 75,429	1,399 / 80,492
Form (m ² /1,000won)	Plywood	5,265 / 108,574	5,265 / 108,574	5,265 / 108,574	5,266 / 108,595
	Euro-form	1,314 / 19,213	1,314 / 19,213	1,314 / 19,213	1,438 / 21,026
Total (1,000won)		337,976	324,804	331,375	355,118

예제구조물에 대한 노무비의 경우, Table 13에서와 같이 I-C-5에 비하여 O-C-5는 8.4%, I-D-5는 15%, S-D-5는 32.4% 높게 나타났다.

Table 13. Labor cost

Work	System	O-C-5	I-C-5	I-D-5	S-D-5
		Reinforcement installation (simple) (ton/1,000won)	174.59 / 71,287	160.95 / 65,719	98.97 / 40,410
Reinforcement installation (complex) (ton/1,000won)			70.87 / 35,192	93.01 / 46,187	
Total (1,000won)		71,287	65,719	75,602	86,912

기계경비의 경우, I-C-5에 비하여 O-C-5는 4.3%, I-D-5는 0.3%, S-D-5는 7.2% 높게 나타났다.

Table 14. Equipment cost

Work \ System	O-C-5	I-C-5	I-D-5	S-D-5
Reinforcement transportation (ton/1,000won)	174.59 / 240	160.95 / 221	169.84 / 234	192.75 / 265
Reinforcement concrete (m ³ /1,000won)	1,352 / 4,625	1,298 / 4,440	1,298 / 4,440	1,385 / 4,738
Total (1,000won)	4,932	4,728	4,741	5,070

본 연구에서 산정한 재료비, 노무비 및 기계경비를 토대로 예제구조물 직접공사비는 I-C-5는 395,251천원, O-C-5는 414,195천원, I-D-5는 411,718천원, S-D-5는 447,100천원이다. 다음 Figure 7과 같이 I-C-5의 직접공사비에 비하여 O-C-5는 4.7%, I-D-5는 4.1%, S-D-5는 13.1% 높게 나타났다.

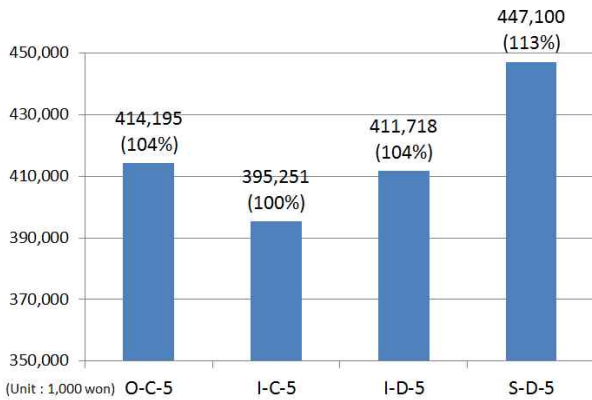


Figure 7. Direct construction cost

6. 결 론

본 연구에서는 KBC2009 기준으로 설계한 5층 철근콘크리트 모멘트-저항골조 구조물을 대상으로 푸쉬오버해석을 수행하여 내진성능을 평가한 후 직접공사비를 산출하여 경제성을 분석하였다.

예제구조물에 대하여 설계계수인 반응수정계수를 평가한 결과 내진설계범주 D 중간모멘트골조를 제외한 모든 구조물은 KBC2009 반응수정계수 보다 큰 값을 나타내었다. IBC2012에서 적용을 제한하고 있는 내진설계범주 D 중간모멘트골조는 KBC2009 반응수정계수 5 보다 작은 3.95를

나타내었다.

FEMA356의 층간변위 기준으로 예제구조물에 대하여 역량스펙트럼법으로 성능수준을 평가한 결과 내진설계범주 C 보통모멘트골조는 인명안전, 내진설계범주 C, D 중간모멘트골조 및 내진설계범주 D 특수모멘트골조는 즉시거주로 모든 구조물이 요구성능수준인 인명안전을 만족하였다.

예제구조물의 직접공사비를 비교하여 경제성을 평가한 결과 내진설계범주C 중간모멘트골조의 공사비를 1로 하는 경우 내진설계범주 C 보통모멘트골조는 1.048, 내진설계범주 D 중간모멘트골조는 1.043, 내진설계범주 D 특수모멘트골조는 1.132를 나타내었다.

이와 같이, 보통 및 중간모멘트골조는 요구성능설계기준을 만족하며 직접공사비 또한 유사한 것으로 평가되었다. 하지만, 특수모멘트 골조는 요구성능설계기준을 만족하나 다른 골조시스템 보다 비경제적인 것으로 평가되었다. 즉, 강기둥 - 약 보 기준으로 인하여 기둥 설계휨강도가 기둥에 접합된 보 설계휨강도 합 보다 커야 하므로 물량이 추가된 것으로 분석된다.

따라서 IBC2012에서는 내진설계범주 D 중간모멘트골조 적용을 제한하고 있지만 5층 철근콘크리트 모멘트-저항골조 구조물의 경우, 특수모멘트골조 보다 보통 및 중간모멘트골조로 설계하는 것이 합리적이라고 판단된다.

요 약

구조물 내진설계에 대한 개념이 사양중심설계에서 성능기반설계로 변화하고 있다. 구조물 목표성능을 직접 부여하여 설계하는 성능기반설계를 위해서는 구조물 실제 거동을 정확히 예측하기 위한 비탄성 구조해석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 KBC2009 기준으로 설계한 5층 철근콘크리트 모멘트-저항골조 시스템 구조물을 대상으로 푸쉬오버해석을 수행하여 내진성능을 평가한 후 직접공사비를 산출하여 경제성을 분석하였다. 분석 결과 보통 및 중간모멘트골조는 요구성능설계기준을 만족하며 직접공사비 또한 유사한 것으로 평가되었다. 하지만, 강기둥-약 보 기준이 적용되는 특수모멘트골조는 요구성능설계기준을 만족하나 다른 골조시스템 보다 비경제적인 것으로 평가되었다. 따라서 IBC2012에서는 내진설계범주 D 중간모멘트골조 적용을 제한하고 있지만 5층 철근콘크리트 모멘트-저항골조 구조물의 경우, 특

수모멘트골조 보다 보통 및 중간모멘트골조로 설계하는 것이 합리적이라고 판단된다.

키워드 : 철근콘크리트 모멘트-저항골조, 내진성능, 성능점, 경제성 분석, 비용 산정

Acknowledgement

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF-2010-0013019) and the Super Computing Center/Korea Institute of Science and Technology Information with super-computing resources including technical support.

References

1. Architectural Institute of Korea, Korean building code-structural, KBC-2009, Architectural Institute of Korea, 2009.
2. International Code Council, International building code, Washington DC, United States International Code Council, Inc, 2006
3. Kang SB, Kim TY, Structural analysis model for reinforced concrete moment-resisting frame systems, *Journal of Korea Concrete Institute*, 2010 Nov;22(2):307-08.
4. Korea Concrete Institute, Concrete design code and commentary, Kimoonjang Publishing Company, 2012
5. Lee DG, Jo SH, Overstrength and response modification factor in low seismicity, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2006 Jun;10(3):57-64.
6. Kang SB, Kim TY, Pushover analysis of a 5-story RC OMRF considering inelastic shear behavior of beam-column joint, *Journal of Korea Concrete Institute*, 2012 Oct;24(5):517-24.
7. Kang SB, Lim BJ, A study on the response modification factor for a 5-story reinforced concrete IMRF, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2012 Oct;16(5):13-21.
8. Federal Emergency Management Agency, Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-356, Washington, DC, Federal Emergency Management Agency, 2000.
9. Applied Technology Council, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood City, Applied Technology Council, Report ATC-40, 1996.
10. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Building construction standard production unit system 6-3-4, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2015
11. Public Procurement Service [Internet], Until the first half of 2015, facility for construction price information; [updated 2015 Mar 6; cited 2015 Jun 1], Public Procurement Service construction equipment section; [about 2 screens]. Available from: <http://www.pps.go.kr>
12. Construction Association of Korea, Commercial construction industry unit wages 2015, Construction Association of Korea, 2015.