



정적 및 동적 해석을 통한 철근콘크리트 무량판 구조의 연쇄 붕괴 저항 성능 평가

이선웅^{1)*} · 신성우¹⁾

¹⁾한양대학교 건축학부

Evaluation for Progressive Collapse Resistance of a RC Flat Plate System Using the Static and Dynamic Analysis

Seon-Woong Lee^{1)*} and Sung-Woo Shin¹⁾

¹⁾School of Architecture, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT Currently, the design guidelines for the prevention of progressive collapse are not available in Korea due to the lack of study efforts in progressive collapse resistance evaluation of RC flat plate system. Therefore, in this study, three types of analysis were conducted to evaluate the progressive collapse resistance of a RC flat plate system. A linear static analysis was carried out by comparing the demand-capacity ratio (DCR) differences of the systems using the alternate load path method, which is the guideline of GSA. A dynamic behavior was investigated by checking the vertical deflection after removal of the column using the linear dynamic analysis. Lastly, a maximum load factor was investigated using the nonlinear static analysis. The finite element (FE) analyses were conducted using various parameters to analyze the results obtained using effective beam width (EB) model and plate element FEM (PF) model. This study results showed that the strength contributions of the slab in the EB models are underestimated compared to those obtained from the PF models. Therefore, a detailed FE analysis considering the slab element is required to thoroughly estimate the progressive collapse resisting capacity of flat plate system. The scenario of the corner column (CC) removal is the most dangerous conditions where as the scenario of the inner column (IC) removal is the least dangerous conditions based on the consideration of various parameters. The analysis results will allow more realistic evaluations of progressive collapse resistance of RC flat plate system.

Keywords : flat plate system, progressive collapse, time history analysis, pushover analysis, effective beam width

1. 서 론

철근콘크리트 무량판 구조(flat plate system)는 최근 공기 단축 및 시공성 향상을 위하여 중·저층은 물론 초고층 건물에서도 사용이 증가되고 있는데 층고 절감, 층간 소음의 제어, 그리고 철근 상세 및 거푸집 작업의 단순화와 같은 많은 장점을 가지고 있다.¹⁾ 1995년 철근콘크리트 무량판 구조인 삼풍백화점 A동 건물 붕괴 사고는 설계, 시공, 유지 보수 및 용도 변경 전 단계에 걸친 총체적인 과오로 인한 것이며, 무량판 구조 그 자체의 결함으로 볼 수는 없을 것이다. 연쇄 붕괴(progressive collapse)는 폭발, 화재, 차량 또는 항공기의 충돌 등 비정상 하중(abnormal loads)에 의하여 구조 부재의 국부적인 파괴, 주변 부재의 파괴, 건물 전체 또는 더 큰 영역

의 파괴로 이어지는 붕괴를 의미한다.²⁾ 국내외에서 철근콘크리트 및 철골 모멘트 골조에 관한 연쇄 붕괴 저항 성능에 관한 연구는 상당한 진전을 보이고 있으나, 무량판 구조에 대한 연쇄 붕괴 저항 성능에 대한 연구는 초기 단계이며, 최근 초고층 주상 복합 건물 등에서 무량판 구조의 사용이 증가하는 추세여서 무량판 구조의 연쇄 붕괴 저항 성능에 대한 연구가 중요하게 인식되고 있다.

신성우 등은 철근콘크리트 골조 구조(frame system)의 연쇄 붕괴 저항 성능 평가 연구³⁾를 기초로 하여 무량판 구조의 실용적인 해석법인 유효 보폭법의 연쇄 붕괴 해석의 적용에 대한 문제점을 선형 정적 해석을 통하여 제시한 바 있는데,⁴⁾ 이 연구에서는 정적 및 동적 해석을 통하여 다양한 변수들을 적용하면서 무량판 구조의 적절한 연쇄 붕괴 저항 성능을 평가하고자 하였다. Kaewkulchai와 Williamson⁵⁾은 선형 정적 해석 방법을 이용한 대체 경로법(alternated path method)은 동적 영향을 반영하지 못하므로 안전하지 못한 해석 결과를 나타낼 수 있다고 하였고, Marjanishvili⁶⁾는 연쇄 붕괴의 모든 과정을 파악

*Corresponding author E-mail: leesw@lh.or.kr

Received December 16, 2010, Revised January 11, 2011,

Accepted January 21, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

하기 위해서는 선형 정적 해석, 선형 동적, 비선형 정적 및 비선형 동적 해석을 차례로 수행하면서 해석을 진행하여야 한다고 주장하였으며, Powell⁷⁾은 선형 정적 해석에서 수행되는 충격 계수 2가 과다설계를 유도할 수 있다고 주장하였다. 따라서 이 연구에서는 FEMA -273⁸⁾에서 제시하는 선형 정적 해석(linear static analysis), 선형 동적 해석(linear dynamic analysis), 비선형 정적 해석(nonlinear static analysis) 방법을 비교하여 유효 보폭 해석 및 플레이트 유한 요소 해석을 비교 평가하였다. 상용 해석 프로그램인 Midas-Gen 7.8.5⁹⁾를 사용하였고 선형 동적 해석은 시간 이력 해석(time history analysis)을 사용하였고, 비선형 정적 해석은 푸시오버 해석(pushover analysis)을 사용하였다.

2. 연쇄 붕괴 해석법

연쇄 붕괴 저항 성능 평가 및 예방 설계 방법으로 가장 널리 알려진 방법은 2003년 미국 General Service Administration (GSA)에서 발표한 연방 건물의 신축과 개축을 위한 연쇄 붕괴 해석과 설계 지침(이하 GSA 가이드라인)¹⁰⁾이 있다.

연쇄 붕괴 해석의 적용 하중은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 정적 해석의 경우는 기둥이 제거된 위치의 양쪽 경간에는 2.0(1.0DL + 0.25LL)을 적용하고 인접 경간에는 1.0DL + 0.25LL의 중력 하중을 적용하였으며, 동적 해석의 경우는 기둥이 제거되는 모델에 1.0DL + 0.25LL의 하중 조합을 적용했다. GSA 가이드라인에 의한 연쇄 붕괴 저항 성능의 제한 기준은 Table 1과 같이 선형해석에서

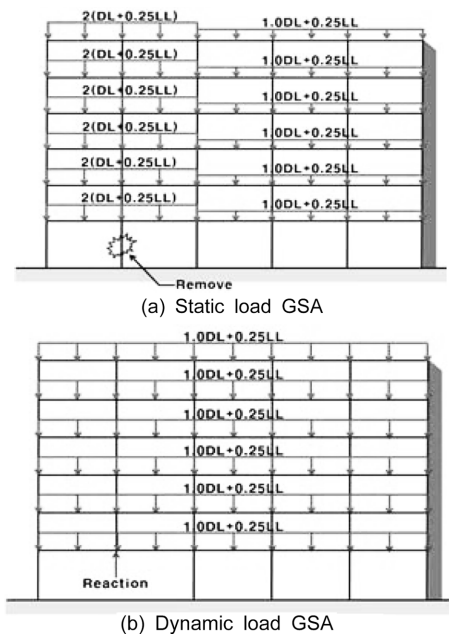


Fig. 1 Applied load of progressive collapse analysis

Table 1 Allowable value for linear and nonlinear analysis of RC beam (GSA)

Linear analysis	Nonlinear analysis
DCR ≤ 2	θ ≤ 6°

는 DCR(demand-capacity ratio) 값을 사용하고, 비선형 해석에서는 부재의 회전각(θ)을 사용한다.¹⁰⁾

선형 정적 해석은 기둥 제거 모델의 수직 하중 재하에 따른 부재의 응력값을 그 부재의 요구량(demand)이라 정의 하고, 기둥이 제거되지 않은 정상 상태에서 사용 하중 및 수평 하중을 고려하여 해석된 건물의 각 부재의 순간적인 극한강도를 능력량(capacity)이라 정의한다. 능력량은 요구 극한강도(Mu)에 강도 감소 계수(Φ)로 나누고, 폭발시 순간적인 하중에 대한 콘크리트 부재의 강도 증진 계수 1.25를 적용하여 식 (1)과 같이 산정할 수 있다. 선형 정적 해석의 연쇄 붕괴 저항 성능 평가 기준인 DCR (demand-capacity ratio)은 요구량을 능력량으로 나눈 값으로 식 (2)와 같이 정의된다. DCR 값이 정형 건물에서는 2.0이하, 비정형 건물에서는 1.5이하를 만족한다면 휨에 의해 추가적인 붕괴가 일어나지 않는다고 판단한다.¹⁰⁾

$$Capacity = \frac{1.25}{\Phi} M_u \quad (1)$$

$$DCR = \frac{Demand}{Capacity} \quad (2)$$

선형 동적 해석은 선형 정적 해석과 동일하게 DCR 값으로 성능을 판단하게 되는데, 선형 정적 해석 결과와의 비교를 위하여 이 연구에서는 기둥 제거 부위의 수직 처짐으로 비교하고자 한다. 동적 해석은 Fig. 1과 같이 하중은 작으나 동적 효과를 고려하는 것으로 수직 처짐이 작다면 제거 후 응력(휨모멘트, 전단력)이 작을 것이며 DCR 값은 작아질 것이다. 선형 동적 해석은 비정상 하중에 의한 기둥의 제거 효과를 나타낼 수 있도록 Fig. 1(b)의 1.0DL + 0.25LL에 대해서 기둥이 제거된 해석 모델에 대한 시간 이력 해석을 수행하여 연쇄 붕괴 성능을 평가하는 방법이다. 비정상 하중에 의한 기둥의 제거 효과는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 해석 결과에서 산출된 제거 대상 기둥의 부재력을 기둥이 제거되는 부분에 동일하게 반력으로 가하여 일정 시간 동안 힘의 평형을 유지하도록 한 후, 가하여진 반력을 시간 이력 해석 동안에 제거하는 방법을 사용하여 얻을 수 있다. 이 연구에서는 Fig. 2에 명시한 반력(P: 축력, V: 전단력, M: 휨모멘트)을 0~5초까지 선형으로 증가시키고, 5~7초까지는 일정하게 유지시켰으며, 7

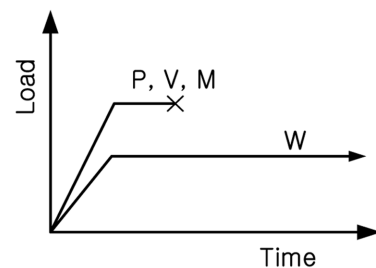


Fig. 2 Linear dynamic analysis procedure

초 이후에는 완전히 제거함으로써 구조물의 수직 방향 진동이 발생하도록 하였다. Fig. 1(b)의 하중(W)은 0~5초 까지 선형으로 증가시키고, 5~30초까지 일정하게 유지시켰다. 구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였다.

비선형 정적 해석(pushover 해석)은 임의의 기둥을 제거하고 기둥이 제거된 위치에서 수직 방향으로 변위를 점차 증가 시키면서 구조물의 거동을 파악하는 방법으로 비정상 하중에 의하여 구조물의 특정 부재가 파괴되었다고 가정하고 남은 부재들의 연쇄 붕괴 저항 성능을 평가하는 것이다. 제거된 기둥이 부담하던 부재력은 인근 부재로 전달되고 부재력을 전달받은 부재는 보유 강도까지 저항하다가 항복하면 다른 부재로 하중을 재분배시킴으로써 붕괴에 저항하게 된다. 각 변위 단계에서 구조물의 저항력을 평가할 수 있다.

푸쉬오버 해석은 하중 증가 방법 및 변위 증가 방법이 있는데, 이 연구에서는 기둥이 제거된 위치의 수직 변위가 점차적으로 증가함에 따라 모든 부재에 작용하는 하중도 동일한 비례로 증가시키면서 그 때 필요한 하중을 계산하는 방식으로 진행했다. 부재의 힘-변형 관계는 항복 이후 최대 저항력에 도달한 이후 저항 성능이 감소되는 FEMA-356¹¹⁾ 이력 모델을 사용하였다. 비선형 해석 시 각 부재의 파괴 여부를 판단하는 기준인 허용값(acceptance criteria, AC)은 연성요구도(μ)와 회전각(θ)으로 주어지 있으나 철근콘크리트 구조물에서 보에 대한 연성요구도는 주어지지 않고 단지 회전각(θ)으로 판단한다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta}{\text{보길이}}\right) \quad (3)$$

GSA에서 제시한 철근콘크리트 구조의 비선형 해석 시 연쇄 붕괴 저항 성능 허용값은 Table 2와 같다.¹⁰⁾ 회전각(θ)을 구하는 방법은 식 (3)과 같으며 Δ 는 Fig. 3과 같이 기둥이 제거된 부분의 수직 변위를 나타낸다. 이 연구에서는 최대 하중 계수와 처짐의 관계 그래프를 이용하여 처짐(회전각)에 대한 제한 및 최대 하중 계수에 저항하는지 여부를 검토하고자 한다. 만약 최대 하중 계수가 1보다 작으면 비선형 정적 해석에 대한 중력 하중 조합인 $2(D + 0.25L)$ 에 의한 하중에 저항하지 못한다는 것을 의미할 것이다.

Table 2 Acceptance criteria for nonlinear analysis

Component	Ductility (μ)	Rotation (θ , degrees)	Rotation (% , radians)
Reinforced concrete (R/C) beam	-	6	10.5
R/C columns (tension control)	-	6	10.5
R/C columns (compression control)	1	-	-
R/C frames	-	2	3.5
Prestressed beam	2	-	-

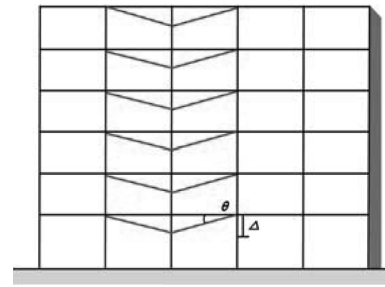


Fig. 3 Definition of rotation angle

3. 예제 구조물 모델링 및 설계 하중

3.1 유효 보폭 모델 및 플레이트 유한 요소 모델

이 연구에서는 철근콘크리트 무량판 구조에 대해 유효 보폭 모델(effective beam width model, 이하 EB 모델)을 사용한 경우와 플레이트 유한 요소를 적용한 모델(plate FEM analysis, 이하 PF모델)을 비교 평가하였다. Jacob S. Grossman은 UC Berkely에서 수행한 실험에 근거한 저감계수를 사용하여 구조물의 층간 변위에 따른 슬래브의 강성 저감 효과를 비교적 정확하게 예측할 수 있도록 식 (4)와 같은 유효 보폭 산정식을 제시하였다.¹²⁻¹⁴⁾

$$\alpha l_2 = K_d[0.3l_1 + C_2(l_2/l_1) + (C_2 - C_1)/2](d/0.9h)K_{FP}$$

$$\text{with limits: } 0.2K_dK_{FP}l_2 \leq \alpha l_2 \leq 0.5K_dK_{FP}l_2 \quad (4)$$

여기서, αl_2 는 횡력 방향의 슬래브를 치환한 등가의 유효폭이며, l_2 는 횡력 방향에 직교하는 방향의 기둥간 스펬길이, l_1 은 횡력 방향과 일치하는 방향의 기둥간 스펬길이, C_2 는 횡력 방향에 직교하는 방향의 기둥 크기, C_1 는 횡력 방향과 일치하는 방향의 기둥 크기이다. K_d 는 횡하중에 대한 구조물의 균열 강성을 고려한 감소 계수로 층간 변위에 제한에 의한 차이이므로 이 연구에서는 층간 변위를 $H/400$ 로 보고 동일하게 1로 적용하였고, K_{FP} 는 기둥의 위치에 따른 감소 계수이며, 내부 기둥의 경우는 1.0, 외단부 기둥의 경우는 0.8, 모서리 기둥의 경우 0.6을 적용한다. 이는 모멘트가 기둥과 슬래브에 전달되는 경우 불균등 모멘트의 60%는 위험 단면 주위에서 휨으로 전달되고, 나머지 40%는 힘 방향의 직교 방향의 슬래브의 비틀림 강성으로 위험 단면의 중심에 대한 전단

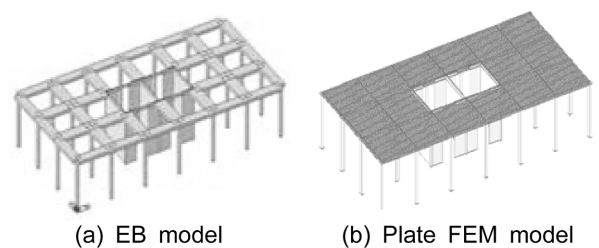


Fig. 4 Typical floor modeling

편심으로 전달된다고 보는 것이다. 이 연구에서는 수직 하중의 분배에서의 보 요소와 판 요소의 비교를 목적으로 EB 모델은 Grossman의 제안식을 이용하여 Fig. 3(a)과 같이 유효 보를 적용하여 모델링을 하였으며, PF모델은 Fig. 3(b)와 같이 모델링하였다.

3.2 예제 구조물의 모델링

예제 건물은 Fig. 5와 같은 철근콘크리트 무량판 구조로 한 경간 당 길이는 7.8 m로 하여 3×6경간으로 하였다. 층고는 1층만 4.2 m이고, 나머지 층은 3 m로 하였다. 연쇄 붕괴 저항 성능 평가를 위해 평가 모델에서 제거되는 최하층 기둥의 위치는 Fig. 4와 같이 선정하였다. 해석 모델명의 표기는 Table 3과 같이 정적 및 동적 해석 방법, 슬래브 해석 방법, 건물 층수, 기둥 제거 위치의 순으로 표기했다.

Table 4에서 부재의 크기 및 강도를 나타냈는데, 기둥의 크기는 600~700 mm를 적용하였고, EB model의 유효 보는 2,400×250 mm 및 2,000×250 mm를 적용하였고, 콘크리트 강도(f_{ck})는 30 MPa를 적용하였다.

Table 3 Classification of model name

Classification	Expression	Remark
Analysis method	LS	Linear static analysis
	LD	Linear dynamic analysis
	NS	Nonlinear static analysis
Slab analysis	EB	Effective beam width model
	PF	Plate FEM model
Story number	5F	5 storied building
	10F	10 storied building
Location of the column removal	CC	Coner column
	IC	Linner column
	LC	Long-side direction column
	SC	Short-side direction column

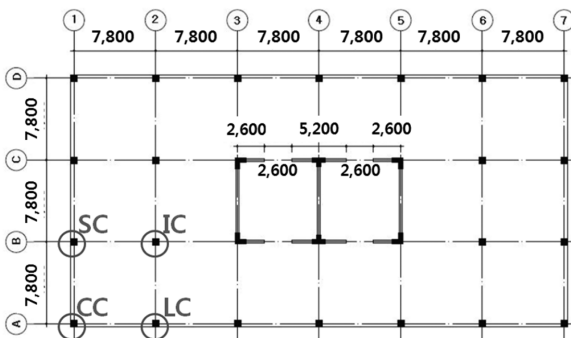


Fig. 5 Model plan

Table 4 Element size

Element		Element size (mm)
Column	5 storied building	600×600
	10 storied building	600×600 (6~10F) 650×650 (1~5F)
Wall	Long-side direction	300 (thickness)
	Short-side direction	200 (thickness)
Slab		250 (thickness)

Table 5 Gravity load

Division	Roof	Floor
Dead load (kN/m ²)	2	3
Live load (kN/m ²)	1	2

Table 6 Coefficient for seismic design

Division	Contents
Coefficient of regional difference (A)	0.22 (seismic zone 1)
Site class	S _A
Importance factor (IE)	1.2 (seismic category I)
Response modification factor (R)	5
Displacement amplification factor (Cd)	4.5

Table 7 Base shear force

Model	Division	Seismic base shear force (kN)	
		RX	RY
EB-5F		2271.29	2480.82
PF-5F		2598.60	2957.86
EB-10F		1802.20	3373.80
PF-10F		3284.59	3666.80

3.3 설계 하중

하중 기준은 KBC 2009^{15,16)}에 의해 설계하였으며, 사용 하중은 Table 5와 같이 지붕의 마감 하중은 바닥 마감 및 천정 등 하중을 적용하였고, 바닥의 마감하중은 고정칸막이 벽, 바닥 마감, 천정 등 하중을 고려하였으며, 풍하중의 영향은 생략했다. Table 6의 지진 하중 산정을 위한 계수에 의하여 내진 설계 범주(seismic design category) B를 적용하여 건물 골조와 중간 모멘트 골조의 조합 골조 시스템으로 설계하였다. 지진하중에 대한 해석은 동적 해석의 일종인 응답 스펙트럼 해석(response spectrum analysis)과 등가 정적 해석을 동시에 수행하여 보정 계수(modification factor)를 적용한 하중을 적용했으며, 밀면 전단력은 Table 7과 같다.

4. 연쇄 붕괴 해석 결과

4.1 선형 정적 해석 결과

선형 정적 해석에서 구한 각 구조물의 DCR 값은 Figs.

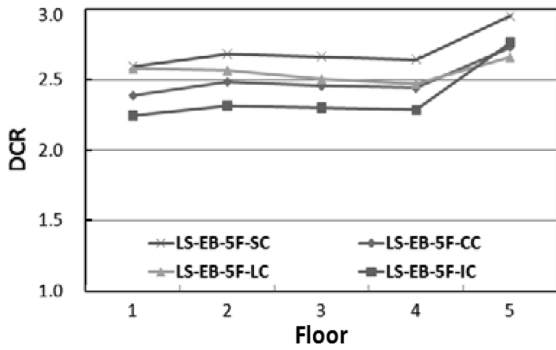


Fig. 6 DCRs flexure of LS-EB-5F model

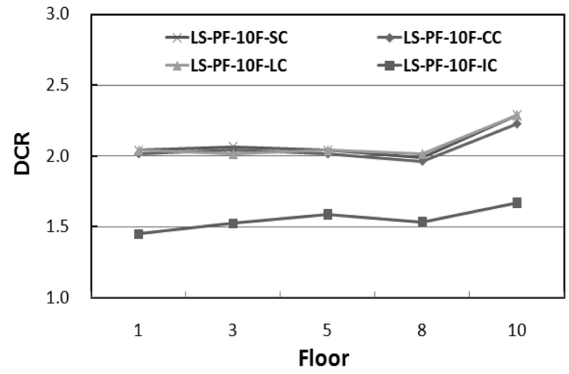


Fig. 9 DCRs flexure of LS-PF-10F model

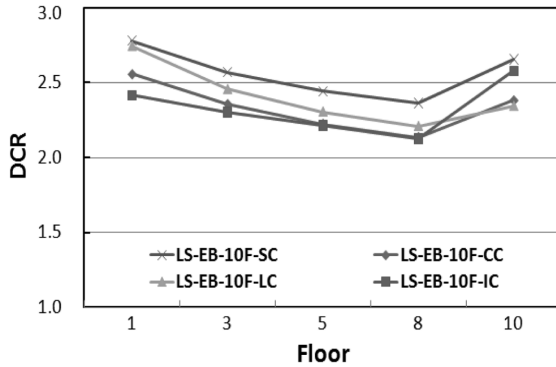


Fig. 7 DCRs flexure of LS-EB-10F model

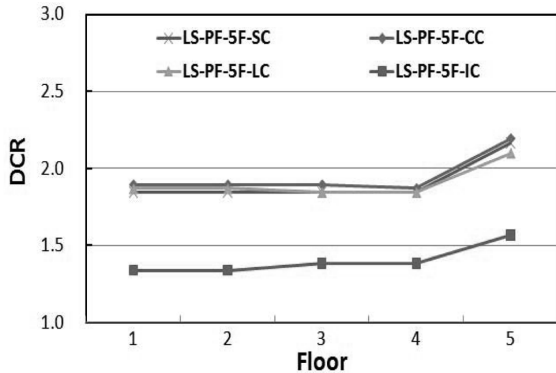


Fig. 8 DCRs flexure of LS-PF-5F model

않은 것으로 판단된다. EB model과 PF model의 가장 큰 차이점은 슬래브의 강성 기여도의 차이로 인하여 EB model에서는 내부 기둥(IC)이 제거될 경우가 가장 불리한 조건이다. PF model은 모서리 기둥(CC)을 제거할 경우가 가장 불리한 조건으로 나타났다. PF model이 슬래브의 강성 기여도 및 하중 분배 거동을 적절하게 반영하는 것으로 볼 때 모서리 기둥(CC)을 제거할 경우가 가장 불리한 조건이고, 내부 기둥(IC)이 제거될 경우가 가장 유리한 조건으로 판단된다. PF model의 DCR 값은 일부 지붕층을 제외하고는 2 이하로 대체적으로 연쇄 붕괴 저항 성능을 만족하는 것으로 나타났는데 지붕층 사용 하중이 일반층에 비해 너무 작아 기둥 제거 전의 부재력이 작은 결과이다.

4.2 선형 동적 해석 결과

시간 이력 해석(time history analysis)이 시작되고 7초 후에 반력을 제거하여 구조물이 수직 방향으로 자유 진동하도록 한 후 수직 변위에 대한 결과는 Table 8 및 Figs. 10~13과 같다. 예제 모델의 모든 경우에 있어서 기둥의 순간적인 제거로 인하여 변위가 발생하지만 몇 번의 진동 후에 10초 근처의 탄성 범위 내에서 탄성 변형 값으로 수렴함을 알 수 있다. EB-5F model의 내부 기둥(IC)을 제거할 경우 7.2초에서 116mm의 최대 처짐이 발생하는데, 슬래브 강성 기여를 전혀 반영하지 못한 결과이며 선형정적 해석에서의 결과보다 불리한 결과이다. EB-10F model은 내부 기둥을 제거할 경우 7.2초에서 73.7mm의

6~9와 같다. EB model은 PF model에 비해 연쇄 붕괴 저항 성능 판단에 지나치게 보수적인 결과를 나타내고 있어, EB model에 하중 계수 2를 적용하기에는 적절하지

Table 8 Vertical deflection of linear static analysis and linear dynamic analysis

	CC removal			IC removal			LC removal			SC removal		
	Static analysis	Dynamic analysis		Static analysis	Dynamic analysis		Static analysis	Dynamic analysis		Static analysis	Dynamic analysis	
		Deflection (mm)	Time (sec)		Max. deflection (mm)	Deflection (mm)		Time (sec)	Max. deflection (mm)		Deflection (mm)	Time (sec)
EB- 5F	56.7	7.2	60.1	75.2	7.2	116	62.1	7.2	65.3	62.0	7.2	65.3
EB-10F	61.7	7.2	56.5	80.2	7.2	73.7	65.6	7.2	62.5	66.9	7.2	62.8
PF- 5F	60.7	7.2	45.5	51.7	7.2	44	55.3	7.4	45.6	54.7	7.4	42.3
PF-10F	66.7	7.4	51.3	57.6	7.2	49	62.4	7.2	49.3	62.1	7.2	48.7

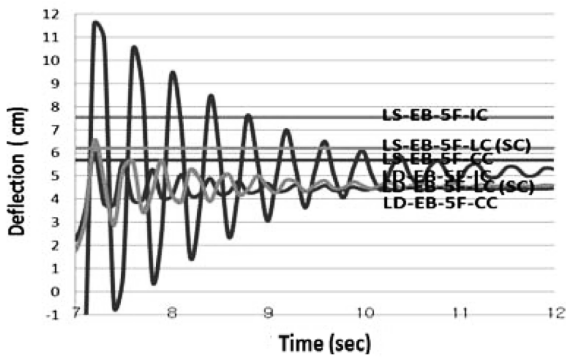


Fig. 10 Vertical deflection of EB-5F model

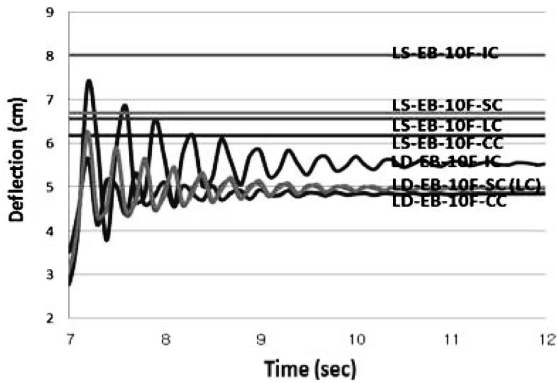


Fig. 11 Vertical deflection of EB-10F model

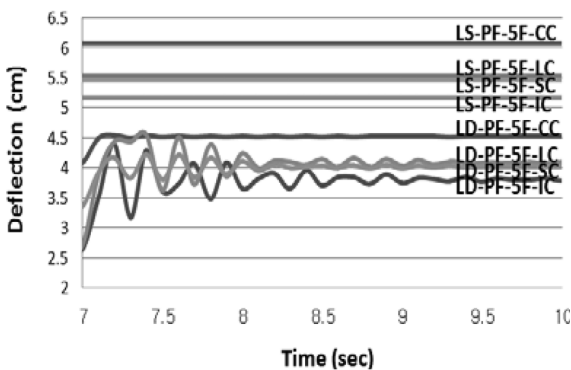


Fig. 12 Vertical deflection of PF-5F model

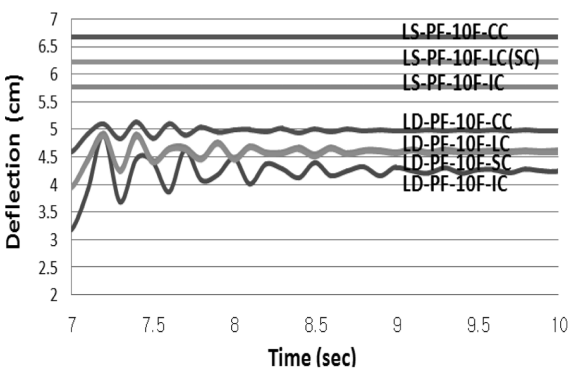


Fig. 13 Vertical deflection of PF-10F model

최대 처짐이 발생하였다. PF model의 시간이력 해석 결과로부터 선형 정적 해석의 하중 계수 2는 충분히 여유

가 있는 값을 보여 주고 있다. 동적 해석시에는 구조물의 감쇠를 고려하므로 수직 처짐이 적게 발생하는 것으로 판단된다. PF model의 경우 모서리 기둥(CC)을 제거하였을 경우 가장 큰 변위가 발생하고, 층수가 증가할수록 연쇄 붕괴에 대한 저항 능력이 커짐을 알 수 있는데, 이것은 선형 정적 해석과 동일한 결과이다. EB model 및 PF model에서 공통적으로 동적 해석시 장변 방향 기둥 제거시와 단변 방향 기둥 제거시의 거동은 유사한 것으로 보인다.

4.3 비선형 정적 해석 결과

비선형 정적 해석은 기둥이 제거된 위치의 수직 변위를 조금씩 증가시키면서, 각 변위 단계에서 구조물에 재하되는 하중패턴의 비(load factor)를 구하여 연쇄 붕괴 저항 성능을 평가하는 방법이다. 만약 최대 하중 계수가 1보다 작으면 비선형 정적 해석에 대한 중력 하중 조합인 $2(D+0.25L)$ 에 의한 하중에 저항하지 못함을 알 수 있다. 비선형 정적 해석은 동적 해석에 비해서 정확도가 다소 줄어들지만 이를 통하여 구조물의 연쇄 붕괴에 대한 최대 저항 성능을 평가할 수 있을 뿐만 아니라 하중 단계별 거동을 동적 해석에 비해 쉽게 평가할 수 있다.

김진구 등¹⁷⁾은 제거된 기둥을 중심으로 좌우가 대칭인 경우 제거된 기둥의 양쪽 골조가 똑같이 저항하고 모든 보에 소성힌지가 발생할 때 까지 하중 계수는 증가한다고 연구를 발표하였다. EB model의 비선형 정적 해석의 결과는 Figs. 13~16에 나타난 바와 같이 동적 증폭 효과

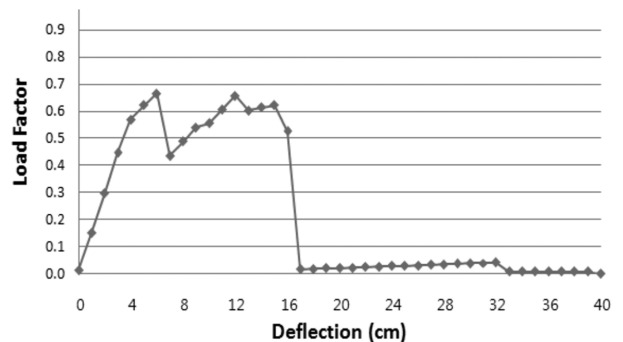


Fig. 14 Capacity curves of NS-EB-5F-CC model

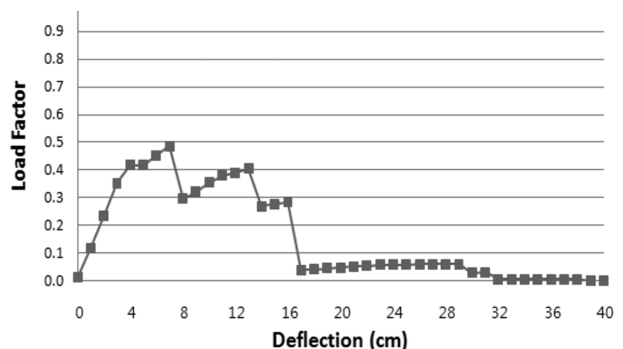


Fig. 15 Capacity curves of NS-EB-5F-IC model

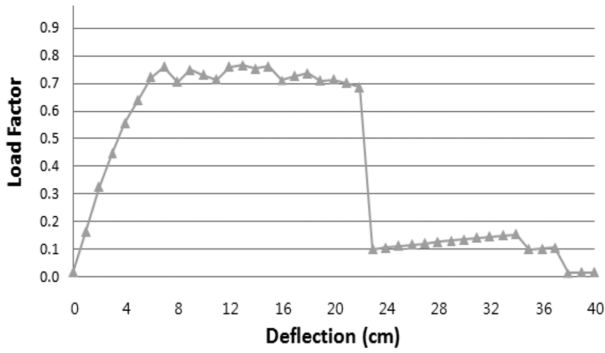


Fig. 16 Capacity curves of NS-EB-10F-CC model

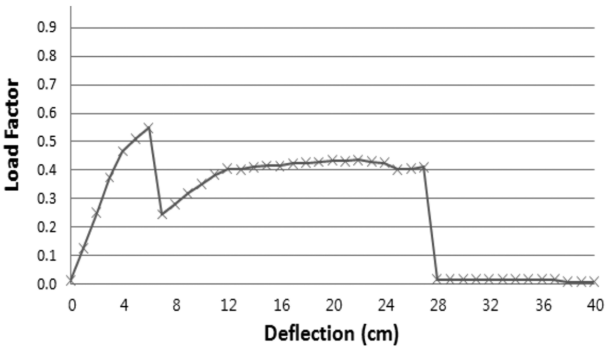


Fig. 17 Capacity curves of NS-EB-10F-IC model

를 고려한 하중 조합에 의한 하중, 즉 하중 계수가 1인 지점에 미치지 못한 상태에서 구조물의 내력이 저하되는 것으로 나타나 선형정적 및 선형 동적 해석의 결과와 일치하고 있다. 또한, 대체적으로 수직 처짐 60~70 mm (0.5') 부위에서 항복점이 형성되어 수직 처짐 200~400 mm 부위에서 붕괴가 이루어지고 있어 GSA의 비선형 해석 가이드라인 800 mm (6')에 비해 연쇄 붕괴 저항 성능에 여유가 있음을 보여주는 것으로 기둥이 파괴된 후에 수평 부재(슬래브)에 의해 대체 하중 경로를 확보하여 건물이 연쇄 붕괴에 대해 저항하는 것을 나타내고 있다. PF model의 비선형 정적 해석은 플레이트 유한 요소에 대한 프로그램의 한계로 인하여 이 연구에서는 생략했다.

5. 결 론

이 연구에서는 GSA 가이드라인 기준에 따라 철근콘크리트 무량판 구조의 연쇄 붕괴 저항 성능을 평가하고자 하였다. 선형 정적 해석을 통하여 DCR 값의 차이를 비교하였고, 선형 동적 해석을 통하여 기둥 제거 이후의 수직 변위를 비교하였으며, 비선형 정적 해석을 통하여 최대 하중 계수 및 최대 변위를 판단하였다.

- 1) 동적 해석을 통하여 정적 해석에서의 중력 하중 증폭계수 2는 Powell의 연구 결과⁷⁾와 동일하게 매우 보수적인 결과임을 알 수 있다. 구조물의 연쇄 붕괴 거동을 정확히 판단하기 위해서는 정적 해석과 더불어 동적 해석을 동시에 수행해야 한다고 판단된다.
- 2) 무량판 구조에서 유효 보폭으로 모델링하는 방법(특

히 저층의 경우)은 슬래브의 강성 기여도를 반영하고 있지 못해 연쇄 붕괴 성능 평가는 상세 유한 요소 해석이 적절할 것으로 판단된다.

- 3) 기둥의 제거 위치에 따른 연쇄 붕괴 저항 성능은 모서리 기둥(CC)을 제거할 경우가 가장 불리한 조건이고, 내부 기둥(IC)을 제거할 경우가 가장 유리한 조건이다.
- 4) 일부 지붕층을 제외하고는 DCR값이 2 이하로 대체적으로 연쇄 붕괴 저항 성능을 만족하는 것으로 나타났다. 지붕층이 불리하게 나타난 것은 지붕층 사용 하중이 일반층에 비해 너무 작아 기둥 제거 전의 부재력이 작은 결과로 지붕층에 대한 별도의 보강이 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 향후, 대 변형을 고려한 기하 비선형 및 균열을 포함한 재료 비선형을 통한 정밀한 해석 및 설계 방법을 수행하고, 강성비에 의해 결정되는 DCR를 기준으로 유효 보폭법과 플레이트 요소를 비교·분석 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

1. 서대원, 최효준, 한범석, 신성우, “RC 플랫플레이트 구조물의 내진 안전성 평가,” 대한건축학회 논문집 구조계, 25권, 8호, 19 pp.
2. Nair, R. S., “Progressive Collapse Basics,” *Proceedings of AISC-SIDNY Symposium on Resisting Blast and Progressive Collapse*, AISC, New York, 2003.
3. 서대원, 김해진, 신성우, “정적 및 동적 해석을 이용한 철근콘크리트 건물의 연쇄 붕괴 저항 성능 평가,” 한국구조물진단학회 학회지, 14권, 6호, 2010.
4. 서대원, 김해진, 신성우, “지속가능한 초고층 건축을 위한 80층 RC 플랫플레이트 건물의 연쇄 붕괴 저항 성능 평가,” 한국생태환경건축학회 논문집, 10권, 5호, 2010, pp. 151~157.
5. Kaewkulchai, G. and Williamson, E. B., “Dynamic Behavior of Planar Frames during Progressive Collapse,” *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, 2003.
6. Marjanishvili, S. M., “Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 18, No. 2, 2004, pp. 79~85.
7. Powell, G., “Progressive Collapse : Case Study Using Non-linear Analysis,” *Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium New York*, 2005.
8. FEMA 273, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.
9. Midas Gen, *General Structure Design System for Windows*, 2009.
10. GSA, *Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Project*, The US General Services Administration, Washington, DC, 2003.
11. FEMA 356, *Prestandard Commentary for the Seismic Reha-*

- bilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.
12. Grossman, J. S., "Verification of Proposed Design Methodologies for Effective Width of Slab-Column Frames," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 2, 1997.
 13. 송수민, "기둥변장비를 고려한 플랫 플레이트 구조의 유효폭에 대한 연구," 한양대학교 대학원 공학석사 학위논문, 2005.
 14. 최정욱, "철근콘크리트 무량판 구조의 횡하중 해석 모델," 전남대학교 대학원 공학박사 학위논문, 2003.
 15. 대한건축학회, 건축구조기준(KBC 2009), 국토해양부 고시 제 2009-1245호, 2009.
 16. 한국건축구조기술사회, 건축구조기준에 따른 내진설계 예제집, KSEA 351-09, 2010, pp. 86~181.
 17. 김진구, 김태완, "비선형 동적 해석 방법을 이용한 철골 모멘트골조의 연쇄 붕괴저항 성능 평가," 대한건축학회 논문집 구조계, 23권, 5호, 2007, pp. 81~90.

요 약 현재 한국에서는 연쇄 붕괴에 대한 설계지침이 적용되고 있지 않으며, 특히 무량판 구조의 연쇄 붕괴 저항 성능에 대한 연구는 초기단계라고 할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 철근콘크리트 무량판 구조의 연쇄 붕괴 저항 성능을 평가하기 위하여 3가지 해석법을 수행하였다. 선형 정적 해석을 통하여 GSA의 대체경로법에 의한 DCR 값의 차이를 비교하였고, 선형 동적 해석을 통하여 기둥 제거 이후의 수직 변위를 비교하였으며, 비선형 정적 해석을 통하여 최대 하중 계수를 판단하였다. 유효 보폭 모델과 판 유한 요소 해석 모델의 차이점을 분석하기 위하여 여러 변수들에 따라 유한 요소 해석이 수행되었다. 무량판 구조에서 실무에서 많이 사용되고 있는 유효 보폭으로 모델링하는 방법은 슬래브의 강성 기여도를 반영하고 있지 못해 연쇄 붕괴 성능 평가는 상세 유한 요소 해석이 적절할 것으로 판단된다. 여러 변수들을 종합 모서리 기둥(CC)을 제거할 경우가 가장 불리한 조건이고, 내부 기둥(IC)이 제거될 경우가 가장 유리한 조건으로 나타났다. 이 연구에서 제시된 무량판 구조의 연쇄 붕괴 저항 성능 결과로부터 향후 무량판 구조의 성능을 합리적으로 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 무량판 구조, 연쇄 붕괴, 시간 이력 해석, 푸시오버 해석, 유효 보폭