화약·발파(대한화약발파공학회지)
제31권 제1호, 2013년 6월, pp. 41~48

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 31, No. 1, 2013, pp. 41-48
Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

응용요소법을 이용한 철근콘크리트 구조물의 연쇄붕괴 저항성능 평가

박 훈[1)*], 석철기[2)], 조상호[3)]

Evaluation of Progressive Collapse Resisting Capacity of RC structure using the Applied Element Method

Hoon Park, Chul-Gi Suk and Sang-Ho Cho

Abstract Progressive collapse is generally defined as a local failure of structural members occurring due to abnormal load which results in the partial collapse or total collapse of a structure. Unlike progressive collapse, explosive demolition is a method of inducing the total collapse of structure by removing all or portion of structural members. In explosive demolition the partial collapse of the structural members can be controlled at appropriate time intervals by blasting, to induce the progressive collapse of the structure and control the collapse behavior. In this study, a nonlinear dynamic analysis was carried out in order to apply the progressive collapse process to explosive demolition design of the RC structure. The occurrence of progressive collapse of analytical models was examined according to the number of floors, the removed column height and span length. For models that resisted progressive collapse, progressive collapse resisting capacity was evaluated.

Key words Progressive collapse, Explosive demolition, Collapse resistance, Applied element method

초 록 일반적으로 연쇄붕괴는 비정상하중에 의해 구조부재의 국부손상이 구조물의 국부파괴 또는 전체파괴가 발생되는 것을 나타낸다. 연쇄붕괴와는 달리 발파해체는 구조부재의 전체 또는 일부를 제거함으로써 구조물의 전체파괴를 유도하는 공법이다. 이러한 발파해체는 구조부재의 국부파괴를 발파에 의해 적절한 시차로 제어함으로써 구조물의 연쇄붕괴를 유도할 수 있으며, 붕괴거동을 제어할 수 있다. 본 연구에서는 연쇄붕괴 과정을 철근콘크리트 구조물 발파해체 설계에 적용하기 위해 응용요소법을 이용하여 비선형 동적해석을 수행하였다. 해석모델의 층수, 기둥 높이, 스팬 길이에 따른 연쇄붕괴 발생 여부를 검토하고, 연쇄붕괴 저항성능을 평가하였다.

핵심어 연쇄붕괴, 발파해체, 붕괴저항, 응용요소법

1. 서 론

연쇄붕괴는 충격하중 또는 폭발하중 등의 비정상하중에 의해 구조부재의 국부손상이 구조물의 국부파괴 또는 전체파괴로 이어지는 현상을 말한다(ASCE, 2001). 일반적으로 구조물의 구조부재에 국부손상이 발생하면 구조부재에 작용하는 하중은 대체 경로(alternative pass)를 통하여 주변 부재에 전달된다. 주변 부재는 새로운 하중을 받으며 일정한 시간이 지남에 따라 현수작용(catenary action)이 증대되어 평형상태에 도달하게 된다. 재분배된 하중이 주변 구조부재의 강도를 초과하면 국부파괴가 발생되며, 국부파괴가 구조물 전체에 연쇄적으로 전달되면 전체파괴로 이어질 수 있다(Krauthammer, 2008). 이러한 연쇄붕괴 과정은 구조공학 및 방폭공학에서 구조물의 연쇄붕괴를 방지하는 설계에 적용되고 있다.

1) ㈜코리아카코 책임연구원
2) ㈜코리아카코 대표이사
3) 전북대학교 자원·에너지공학과 교수
* 교신저자 : hujin@jbnu.ac.kr
접수일 : 2013년 6월 6일
심사 완료일 : 2013년 6월 17일
게재 승인일 : 2013년 6월 24일

연쇄붕괴와는 달리 발파해체는 구조부재의 전체 또는 일부를 제거함으로써 구조물의 전체파괴를 유도하는 공법이다. 이러한 발파해체는 다수의 층에서 구조부재의 국부파괴를 적절한 시차로 제어함으로써 구조물의 연쇄붕괴를 유도할 수 있으며, 구조물 전체의 붕괴거동을 제어할 수 있다. 발파에 의해 국부손상이 발생된 구조부재에 작용하던 하중은 주변 구조부재로 재분배되고 수직 내력의 변화에 의해 주변 구조부재에 영향을 준다. 주변 구조부재의 현수작용이 증대되어 평형상태에 도달하기 전에 적절한 시차로 주변 구조부재의 국부손상을 유발함으로써 전체 구조물의 연쇄붕괴를 유도할 수 있다(박훈 외, 2012).

본 연구에서는 연쇄붕괴 과정을 철근콘크리트 구조물 발파해체 설계에 적용하기 위해 연쇄붕괴에 영향을 미치는 요소 중 층수, 기둥 높이, 스팬 길이의 변화에 따른 연쇄붕괴 저항성능을 비교하였다. 응용요소법(AEM, Applied Element Method)을 기반으로 하는 ELS(Extreme Loading for Structures) 소프트웨어를 사용하여 해석 대상 구조물을 모델링하고, 비선형 동적해석을 수행하였다(Tagel-Din, 2009, 박훈 외, 2012).

2. 연쇄붕괴 해석

2.1 해석 모델

해석 대상 구조물은 4 스팬, 4 베이를 가지는 철근콘크리트 구조물로써 층수, 기둥 높이, 스팬 길이에 따라 표 1과 같이 구별하였으며 해석모델을 나타내는 기호의 예시는 다음과 같다.

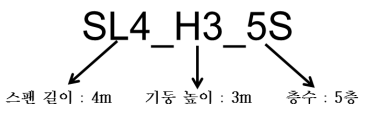


표 1. 해석 대상 구조물

Model	Number of floors	Column height [m]	Span length [m]
SL4_H3_5S	5	3	4
SL6_H3_5S	5	3	6
SL8_H3_5S	5	3	8
SL4_H3_10S	10	3	4
SL6_H3_10S	10	3	6
SL8_H3_10S	10	3	8
SL6_H4_10S	10	4	6
SL6_H5_10S	10	5	6

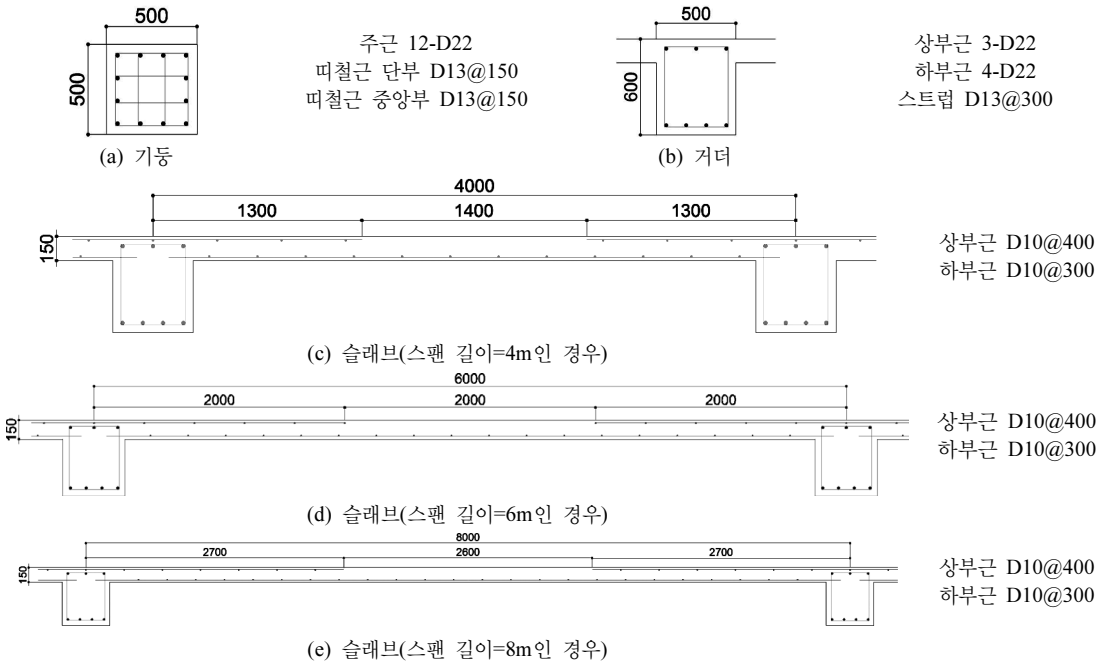


그림 1. 콘크리트 부재 규모와 철근 배근도 [unit: mm].

표 2. 재료의 물성

Material	Young's modulus [GPa]	Compressive strength[MPa]	Tensile strength [MPa]	Tensile yield stress [MPa]	Ultimate strength [MPa]
Concrete	26.2	24	0.2	—	—
Reinforcement	200.0	—	—	360	504

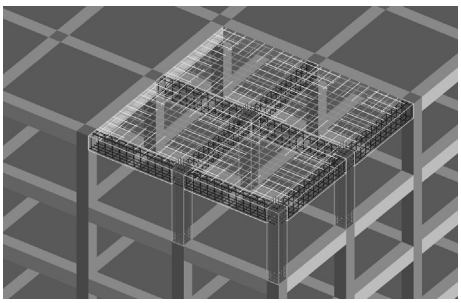


그림 2. SL4_H3_5S 모델의 배근상태.

각각의 해석 모델은 그림 1과 같이 콘크리트 부재의 규모 및 철근의 배근에 따라 3차원으로 모델링하였다. 기둥과 거더의 배근은 전체 해석 모델에 동일하게 적용하였으며, 슬래브의 상부근은 스팬 길이의 약 1/3인 1.3m, 2.0m, 2.7m로 양단에서 각각 배근하였다. 또한 각각의 해석 모델에 사용된 콘크리트와 철근의 물성은 표 2와 같이 동일하게 설정하였다. 그림 2는 SL4_H3_5S 모델의 기둥, 거더, 슬래브의 배근 상태를 나타낸 것이다.

2.2 해석 방법

표 1과 같이 구조물의 층수, 기둥 높이, 스팬 길이가 서로 다른 8가지의 해석 모델에 대해 비선형 동적해석을 수행하였다. 동적해석을 수행하기 위한 하중 조합은 GSA(General Services Administration)에서 제시한 식(1)을 적용하였다(GSA, 2003).

$$Load = DL + 0.25LL \quad (1)$$

여기서, DL은 사하중, LL은 활하중이다.

해석은 정적해석 단계와 동적해석 단계로 수행된다. 정적해석 단계는 기둥을 제거하기 전의 자중에 따른 전체 구조물의 변형을 해석하는 단계이다. 동적해석 단계는 동적해석 시간증분에 따라 비선형 해석을 하

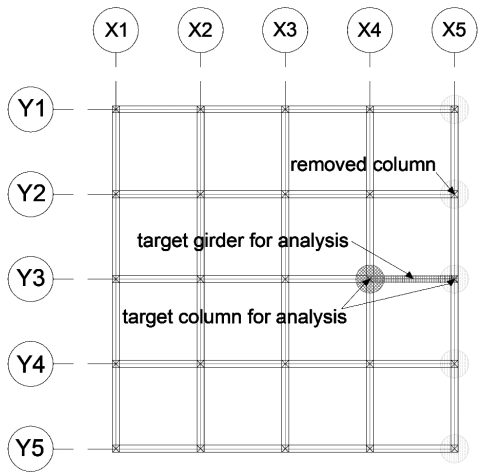
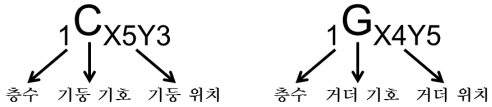


그림 3. 제거 대상 기둥 위치 및 해석 대상 기둥과 거더의 위치.

는 단계로, 본 연구에서는 동적해석 증분시간은 0.001초이고, 전체 동적해석 시간은 5초로 설정하였다. 해석모델에서 나타내는 기둥과 거더의 기호의 예시는 다음과 같다.



동적해석 단계에서 해석 모델의 제거 대상 기둥의 위치는 그림 3과 같이 1층 X5열의 기둥($_1C_{X5Y1}$, $_1C_{X5Y2}$, $_1C_{X5Y3}$, $_1C_{X5Y4}$, $_1C_{X5Y5}$) 요소를 IER(Immaculate Element Removal) 기술을 이용하여 0.01초에 동시에 제거하였다.

각각의 해석 모델에 따른 최종 붕괴 양상, 제거된 기둥($_1C_{X5Y3}$)의 직상부에 작용하는 수직 변위와 자유낙하에 의한 변위를 비교하여 연쇄붕괴 저항성능을 평가하였다. 또한 기둥($_1C_{X4Y3}$)에 작용하는 수직 내력과 제거된 기둥($_1C_{X5Y3}$)의 직상부에 작용하는 수직 변

표 3. 각 조건별 최종 붕괴 양상

Model	Collapse pattern
SL4_H3_5S	Not collapse
SL6_H3_5S	Partial collapse
SL8_H3_5S	Partial collapse
SL4_H3_10S	Not collapse
SL6_H3_10S	Entire collapse
SL8_H3_10S	Entire collapse
SL6_H4_10S	Entire collapse
SL6_H5_10S	Entire collapse

위를 비교하고, 시간에 따른 거더($_1G_{X4X5}$)와 기둥($_1C_{X4Y3}$)의 접합부에 작용하는 수직 응력을 비교하여 현수작용에 의한 연쇄붕괴 저항성능을 평가하였다.

3. 해석 및 고찰

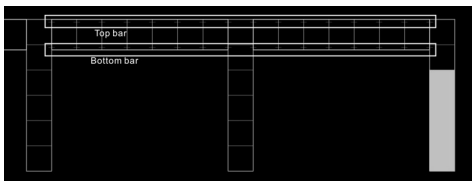
3.1 최종 붕괴 양상

해석 대상 구조물의 층수와 기둥의 높이에 상관없이 스팬 길이가 4m인 모델은 연쇄붕괴가 발생하지 않았으며, 이것은 기둥을 제거한 후 하중의 재분배에 따른 연쇄붕괴에 저항하고 있음을 나타낸다. 그림 4(b), 그림 4(c)와 같이 시간이 지남에 따라 기둥($_1C_{X4Y3}$)과 거더($_1G_{X4X5}$)의 접합부의 상부근은 인장응력이, 하부근은 압축응력이 증가하여 거더($_1G_{X4X5}$)의 현수작용이 증대되어 연쇄붕괴에 저항하고 있음을 알 수 있다.

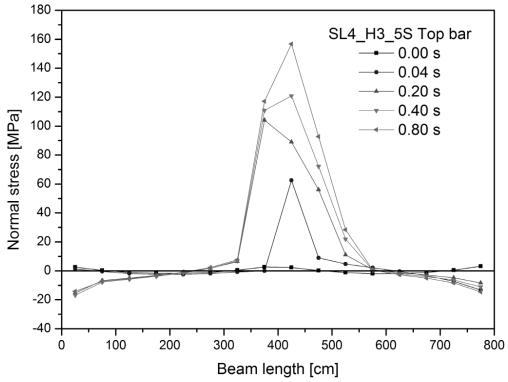
스팬 길이가 6m, 8m의 5층 모델은 국부파괴가 발생하였으나 10층 모델은 전체파괴가 발생하였다. 스팬 길이가 6m인 10층 모델은 기둥의 높이에 상관없이 전체파괴가 발생하였다. 표 3은 각 조건별 최종 붕괴 양상을 나타낸 것이다.

3.2 수직 변위와 자유낙하 변위 비교

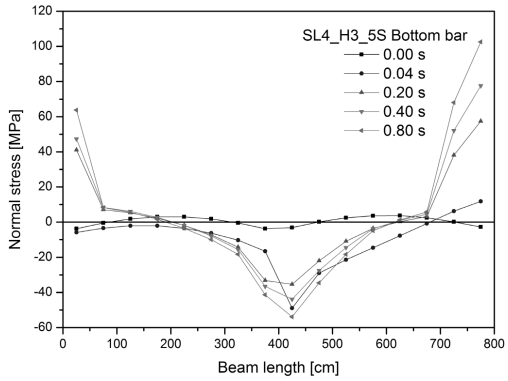
제거된 기둥($_1C_{X5Y3}$)의 직상부에서 작용하는 수직 변위와 자유낙하 변위를 각각 비교한 결과는 그림 5와 같다. 스팬 길이와 기둥 높이가 동일하고 층수가 다른 경우의 수직 변위(그림 5의 (a), (b))는 거의 동일하게 나타났다. 이것은 기둥이 제거된 순간에 제거된 기둥에 작용하고 있는 하중이 대체 경로를 통해 주변부재로 재분배됨으로써 제거된 기둥 직상부에 작용



(a) 해석 대상 철근의 위치



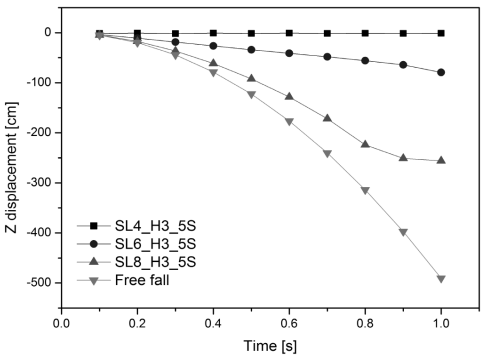
(b) 상부근의 응력



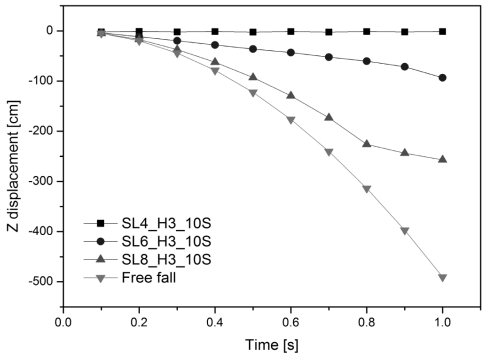
(c) 상부근의 응력

그림 4. 시간에 따른 거더의 철근에 작용하는 응력분포 (SL4_H3_5S 모델).

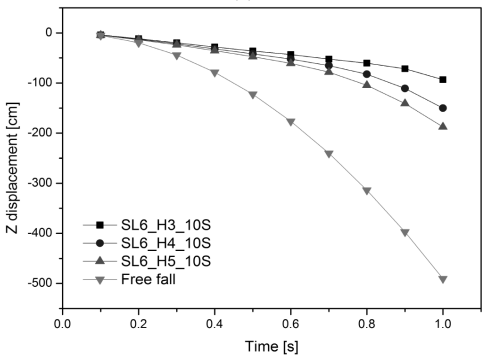
하는 수직 내력이 0이 되기 때문이다. 층수와 기둥 높이가 동일한 경우에는 스팬 길이가 증가할수록 자유낙하 변위에 근접하는 경향을 보였고, 동일한 스팬 길이의 경우(그림 5의 (c))에는 기둥 높이가 증가할수록 자유낙하 변위에 근접하는 경향을 보였다. 이것은 수직 변위가 자유낙하 변위에 근접할수록 연쇄붕괴에 대한 저항성능이 감소되는 것을 의미한다(Loizeaux and Osborn, 2006). 또한 연쇄붕괴의 저항성능은 기둥 높이보다는 스팬 길이에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타났다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 각 조건별 수직 변위와 자유낙하 변위 비교.

3.3 수직 내력과 수직 변위 비교

층수, 기둥 높이, 스팬 길이에 따른 기둥($_1C_{X4Y3}$)에 작용하는 수직 내력과 제거된 기둥($_1C_{X5Y3}$)의 직상부에 작용하는 수직 변위를 비교한 결과는 다음과 같다.

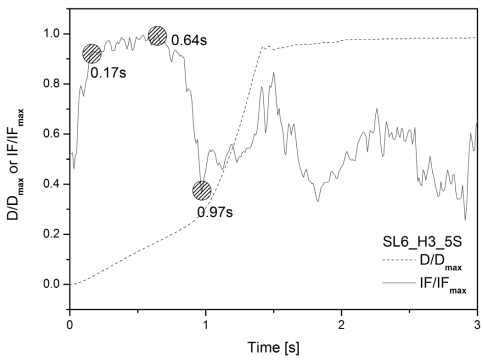
그림 6(a)와 그림 6(b)는 동일한 스팬 길이 6m와 기둥 높이 3m에서 5층과 10층의 시간에 따른 수직 내력비와 수직 변위비를 나타낸 것이다. 5층의 경우 0.64초까지 현수작용이 증대되고 이후부터에 0.97초까지 현수작용이 감소되었다. 10층의 경우 0.69초까지 현수작용이 증대된 후 0.98초까지 현수작용이 감소되었다. 현수작용이 감소되는 0.97초와 0.98초에서의 수직 변위는 급격히 증가하기 시작하며 이것은 연쇄붕괴에 대한 저항성능이 감쇠되는 것을 의미한다. 또한 층수에 따른 현수작용의 증대시간과 감소시간은 거의 유사하였으며 이것은 하중의 재분배 시간이 거의 동일하다는 것을 의미한다.

그림 6(b)와 그림 6(c)는 기둥 높이 3m와 층수 10층이 동일하고 스팬 길이가 각각 6m와 8m인 경우의 시간에 따른 수직 내력비와 수직 변위비를 나타낸 것이다. 스팬 길이가 6m인 경우 최대 수직 내력까지 시간은 0.69초 이지만, 스팬 길이가 8m인 경우에는 최대 수직 내력까지의 시간이 0.18초로 급격히 짧아졌다. 이것은 스팬 길이가 8m의 경우에는 현수작용의 효과가 거의 없으며 연쇄붕괴에 대한 저항성능이 거의 없다는 것을 나타낸다. 따라서 수직 변위는 초기부터 급격히 증가하기 시작하였다.

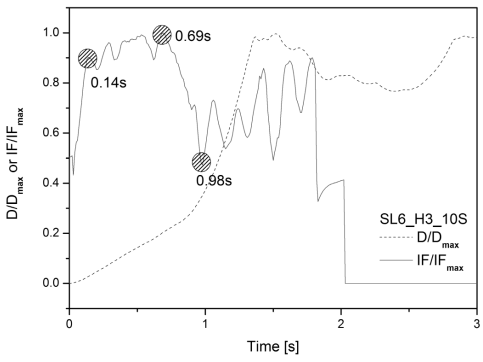
스팬 길이 6m와 층수 10층이 동일한 경우 기둥 높이에 따른 수직 내력비와 수직 변위비를 비교하면(그림 6(b), 그림 6(d), 그림 6(e)) 기둥 높이가 증가함에 현수작용의 증대시간은 각각 0.69초, 0.48초, 0.37초로 감소하였으며, 현수작용이 감소되는 시간은 각각 0.98초, 0.82초, 0.75초로 감소하였다. 이것은 기둥 높이가 증가함에 따라 연쇄붕괴의 저항성능이 감소되는 것을 의미한다.

3.4 수직 응력 비교

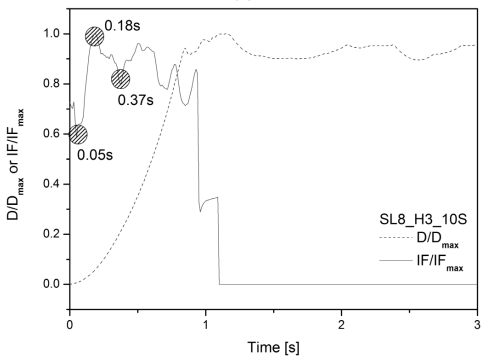
거더($_1G_{X4X5}$)와 기둥($_1C_{X4Y3}$)의 접합부에 작용하는 수직 응력을 비교한 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)와 그림 7(b)는 동일한 스팬 길이 6m와 기둥 높이 3m에서 5층과 10층의 시간에 따른 수직 응력을 나타낸 것이다. 5층과 10층 모두 상부근의 인장파괴가 발생한 후에 하부근은 압축영역에서 인장영역으로 변환되었다. 또한 인장파괴가 발생되는 시간이 각각 0.98초와 0.96초로 거의 유사하였으며, 그림 6(a)와 그림 6(b)의 현수작용 감소시간인 0.97초와 0.98초로 유사하였다. 이것은 상부근의 인장파괴에 의해 거더와 기둥의 접합부의 파괴가 발생하면서 하중 전달 경로를



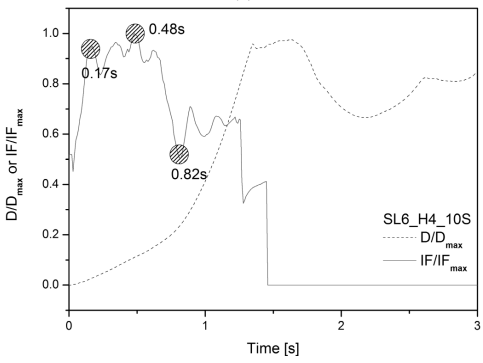
(a)



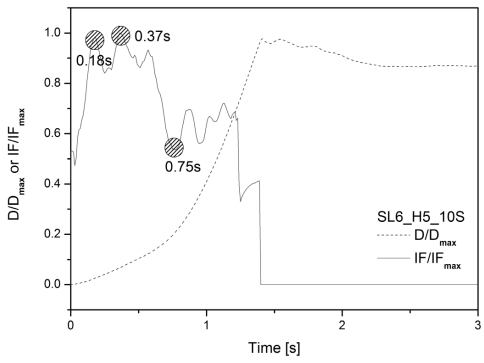
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 6. 각 조건별 수직 내력비와 수직 변위비 비교.

상실함으로써 수직 내력이 감소하기 때문이다.

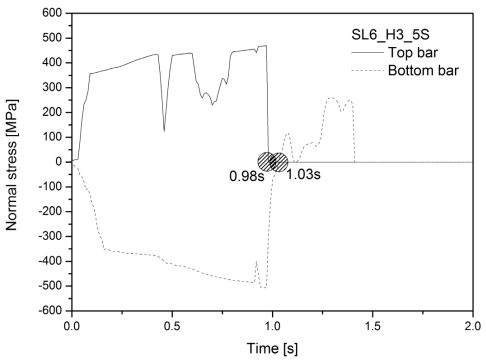
그림 7(b)와 그림 7(c)는 기둥 높이 3m와 층수 10층이 동일하고 스팬 길이가 각각 6m와 8m인 경우의 시간에 따른 수직 응력을 나타낸 것으로, 스팬 길이가 8m인 경우에는 상부근의 인장파괴가 6m인 경우보다 상대적으로 빠르게 발생하였으며, 하부근은 인장영역으로 변환하지 않고 파괴가 발생하였다. 이것은 상부근이 충분한 현수작용의 효과를 발생시키지 못함으로써 연쇄붕괴에 대한 저항성능이 거의 없다는 것을 나타낸다.

또한 스팬 길이 6m와 층수 10층이 동일한 경우 기둥 높이에 따른 상부근과 하부근의 수직 응력을 비교하면, 기둥 높이가 증가할수록 상부근의 인장파괴 발생시간이 짧아지는 경향을 나타낸다. 따라서 거더와 기둥의 접합부에서 작용하는 상부근이 하부근보다 연쇄붕괴의 저항성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

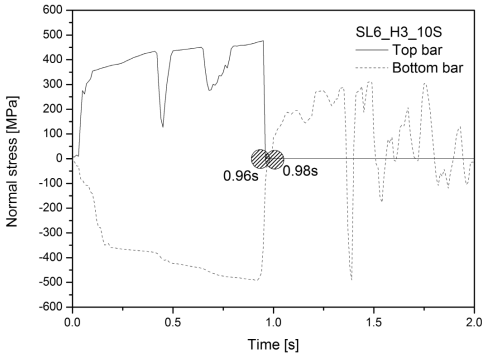
4. 결 론

구조물의 층수, 기둥 높이, 스팬 길이가 서로 다른 해석 모델의 연쇄붕괴 저항성능을 비교하기 위해 비선형 동적해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

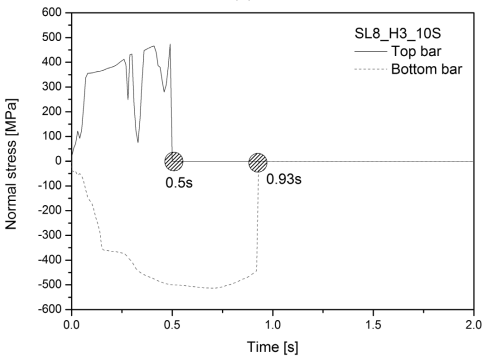
1) 스팬 길이가 4m인 경우에는 구조물의 층수와 기둥 높이에 상관없이 거더의 현수작용이 증대되어 연쇄붕괴에 저항하였으며, 이외의 5층 모델은 국부파괴가 발생하였고, 10층 모델은 전체파괴가 발생하였다.



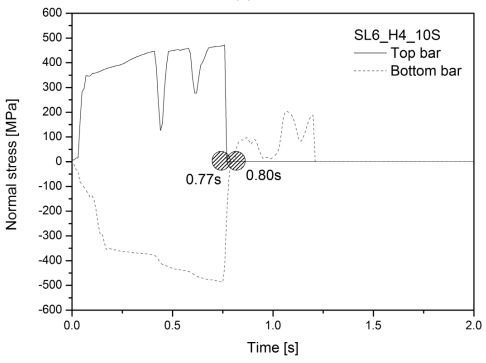
(a)



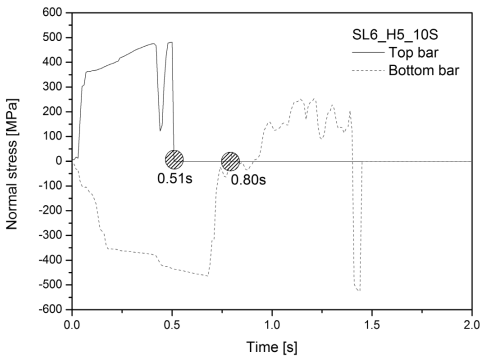
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 7. 각 조건별 상부근과 하부근의 수직 응력 비교.

2) 스팬 길이와 기둥 높이가 증가할수록 수직 변위는 자유낙하 변위에 근접하는 경향을 보이고, 연쇄붕괴에 대한 저항성능이 감소된다. 또한 연쇄붕괴의 저항성능은 기둥 높이보다는 스팬 길이에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타났다.
3) 층수에 따른 현수작용의 증대시간과 감소시간은 거의 유사하였으며, 스팬 길이가 증가함에 따라 연쇄붕괴에 대한 저항성능은 감소하였다.
4) 스팬 길이와 기둥 높이가 증가할수록 거더와 기둥의 접합부에서 상부근의 인장파괴 발생시간이 짧아지는 경향을 보이며, 상부근이 연쇄붕괴에 대한 저항성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2012년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2012 R1A1A2003774).

참고문헌

1. 박훈, 석철기, 고영훈, 정우진, 조상호, 2012, 철근콘크리트 구조물의 연쇄붕괴 해석을 이용한 발파해체 설계, 2012 발파기술 특별공동 심포지엄 논문집, 서울, pp. 145-152.
2. ASCE Standard ASCE/SEI 7-05, 2001, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineering, Reston, Virginia, USA.
3. GSA, 2003, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines, pp. 2-9.

4. Krauthanmmer, T., 2008, Modern Protection Structures, CRC Press, pp. 373-377.
5. Loizeaux, M. and A. Osborn, 2006, Progressive Collapse-An Implosion Contractor's Stock in Trade, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 20, No. 4, pp. 391-402.
6. Tagel-Din H.S., 2009, High Fidelity Modeling of Building Collapse with Realistic Visualization of Resulting Damage and Debris Using the Applied Element Method, ASI, pp. 75-76.

박 훈
㈜코리아카코 책임연구원

Tel: 02-834-4590
E-mail: hujin@jbnu.ac.kr

석 철 기
㈜코리아카코 대표이사

Tel: 02-834-4590
E-mail: kocoh@hanmail.net

조 상 호
전북대학교 자원·에너지공학과 교수

Tel: 063-370-4634
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr