초대형 기둥-아웃리거 시스템의 연쇄붕괴 저항성능 평가

Evaluation of Progressive Collapse Resisting Capacity of Megacolumn and Outrigger System

박 준 희* • 김 진 구**
Park, Junhee • Kim, Jinkoo

요 약

초고층구조물의 경우 중저층 구조물과 다르게 설계시 중력하중과 풍하중의 크기가 매우 크므로 이를 제어하는 구조물의 코어에 강성이 큰 전단벽을 설치하고 최상층에 아웃리거나 벨트트러스를 설치하는 방법을 많이 적용한다. 그리고 홍콩의 IFC와 같이 초대형기둥과 아웃리거를 설치하여 횡하중에 저항하는 구조시스템도 제시되고 있다. 이러한 초고층구조물에서 연쇄붕괴가 발생할 경우 세계무역센터의 붕괴에서 나타나듯이 상상을 초월하는 피해를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 초고층 구조시스템의 연쇄붕괴저항능력을 Pushdown해석을 이용하여 평가하였다.

keywords : *초대형기둥-아웃리거 시스템, 벨트트러스-아웃리거 시스템, 연쇄붕괴, Pushdown해석*

1. 서 론

비정상하중에 의하여 구조물의 국부적인 손상에 의하여 구조물 전체의 붕괴로 이어지는 현상을 연쇄붕괴라고 한다. 영국의 로난포인트 아파트의 붕괴에 의하여 연쇄붕괴에 대한 연구가 간헐적으로 진행되었으나 세계무역센터의 붕괴 이후로 연쇄붕괴에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존의 건축설계기준에서도 연쇄붕괴를 방지하기 위한 방법을 제시하고 있지만 대부분 부재들의 연결강도를 검토하여 구조물의 일체성을 확보하도록 하는 연쇄붕괴에 대한 간접설계방법이다. 이러한 간접설계는 비정상하중에 의하여 제거되는 특정부재의 위치를 고려하지 못한다. 그래서 미국의 General Service Administrator[2003]와 Department of Defence[2005]에서는 각각 연방건물과 국방부 건물의 연쇄붕괴를 방지하기 위한 가이드라인을 발표하였다. 두 가이드라인에서 연쇄붕괴를 방지하기 위한 직접설계법으로 대체하중경로법을 제시하고 있다. 대체하중경로법은 구조물의 특정 부재를 제거하고 추가적으로 파괴되는 부재를 찾는 방법이다.

구조물의 연쇄붕괴와 관련한 연구는 기존 구조물의 연쇄붕괴에 대한 저항성능을 평가와 연쇄붕괴에 대한 구조물의 저항력을 높일 수 있는 방법으로 진행되고 있다. Marjanishvili(2006)는 연쇄붕괴해석을 수행하는 방법으로 선형정적해서, 선형동적해석, 비선형정적해석, 비선형동적해석에 대한 해석과정을 정리하였다. 또한 각각의 해석방법에 대한 장점과 단점을 언급하고 해석방법에 대한 한계를 지적하였다. 그리고 Khandelwal

* 정 회 원 • 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 panay@dreamwiz.com
** 정 회 원 • 성균관대학교 건축공학과 부교수, 교신저자, jkim12@skku.edu

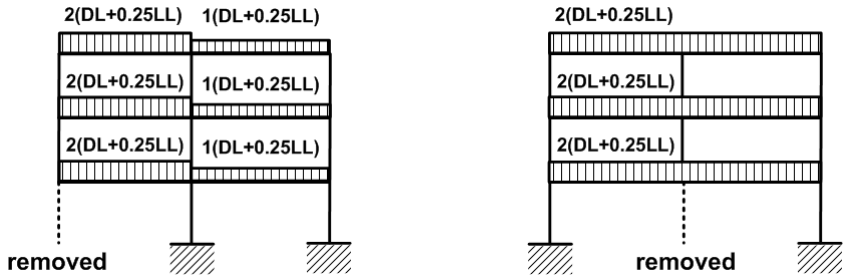
등(2006)은 보 플랜지 절취형(Reduced Beam Section, RBS)내진 철골모멘트접합부에 대한 연쇄붕괴저항력을 해석적으로 연구하였다. 해석결과에 의하면 보의 춤에 따라 접합부의 연성능력과 항복강도와 최대강도비가 다르게 나타난다. 그 결과 기둥이 제거된 후 대변형 상태에서 발생하는 현수작용의 영향이 보의 춤이 다른 해석모델마다 다르게 나타났다.

2. 해석방법

2.1 Pushdown

GSA 와 DoD에서 발표한 연쇄붕괴 가이드라인은 정적해석 시 충격에 의한 영향을 고려하여 하중의 증폭계수로 2를 사용하고 있다. GSA의 가이드라인은 2(DL+ 0.25LL)의 하중조합을 적용하여 해석하고, DoD 의 가이드라인은 중력하중 뿐만 아니라 횡하중을 적용하여 2(1.2DL+ 0.5LL)+0.2W의 하중조합을 적용하여 해석을 수행하도록 권고하고 있다. 본 연구에서는 두 가지 중에서 GSA의 하중조합인 2(DL+0.5LL), 즉 수직하중만을 고려하여 해석을 수행하였다. 2배로 증폭된 하중은 부재가 제거된 경간에만 가해지며 그 외의 경간에는 DL+0.5LL의 하중만이 가해진다 (그림 1참조).

Pushdown 해석 과정은 기둥이 제거된 위치의 수직변위를 조금씩 증가시키면서 그 때 필요한 하중을 계산하는 방식으로 진행된다. 이 하중은 그림 1에 주어진 하중을 100%로 정한 후 모든 위치의 하중을 동일한 비례로 축척하여 결정된다. 따라서 수직변위가 점차적으로 증가함에 따라 모든 위치에서 동일한 비례로 하중이 증가하게 된다.



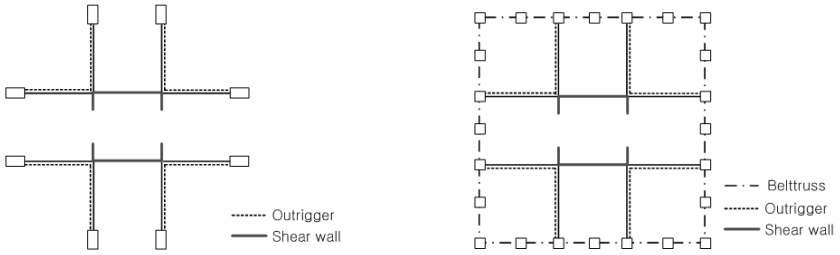
(a) 외부기둥을 제거한 경우 (b) 내부기둥을 제거한 경우

그림 1. 비선형정적해석시 적용한 하중

3. 예제모델

예제모델의 기본 구조시스템은 초대형기둥과 아웃리거가 설치된 구조물과 아웃리거와 벨트트러스가 설치된 두 가지 구조시스템이다. 두 시스템 모두 코어는 전단벽을 설치하였다. 구조물의 층수는 36층으로 하였다. 초대형기둥과 아웃리거가 설치된 시스템은 구조물의 외곽부에 한 면에 2개씩 설치되어있으며, 초대형기둥 사이의 길이는 12m이다. 그리고 최상층에 아웃리거를 설치하여 횡 변위를 제어하였다. 내부기둥과 보는 중력하중만 저항하도록 내부골조와 외부골조를 서로 힌지 접합하였다. 그리고 외부 거더의 접합부도 힌지로 접합

되어 횡하중은 초대형기둥과 전단벽, 아웃리거에 의하여 저항하도록 설계하였다. 벨트트러스와 아웃리거가 설치된 구조물은 벨트트러스를 아웃리거와 함께 최상층에 설치하였다. 벨트트러스를 설치한 모델도 횡하중에 대하여 전단벽, 아웃리거, 벨트트러스에 의하여 저항하므로 연쇄붕괴해석의 기본 모델의 경우 초대형기둥이 설치된 모델과 같이 내부골조와 외부골조를 힌지 접합하고, 외부 거더들도 힌지로 접합되도록 설계하였다.



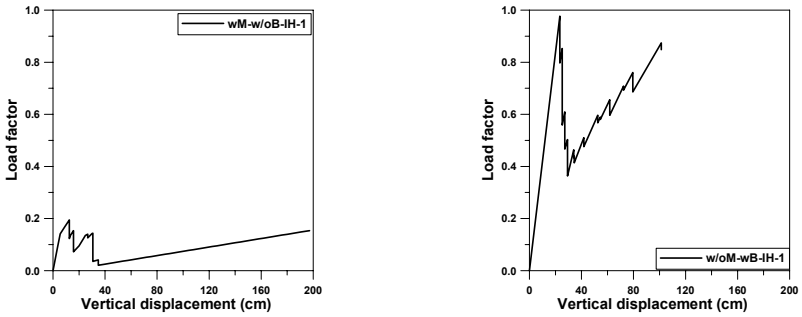
(a) 초대형기둥과 아웃리거시스템 (b) 벨트트러스와 아웃리거시스템

그림 2. 예제모델의 평면 (벨트트러스와 아웃리거가 설치된 모델)

4. 비선형정적해석 결과

비정상하중에 의하여 초기 제거된 기둥 부재를 두 모델 모두 아웃리거와 연결된 기둥으로 가정하고 Pushdown해석을 수행하였다. 초대형기둥과 아웃리거가 설치된 구조시스템은 모든 거더들이 힌지로 접합되어 있기 때문에 1층 기둥이 제거되면 제거된 기둥의 최상층에 위치한 아웃리거에 의하여 중력하중을 저항하게 된다. 그러나 현행설계기준으로 아웃리거트러스를 설계하면 제거된 1층 기둥이 저항하던 하중을 최상층 아웃리거트러스는 저항 할 수 없다. 그래서 제거된 기둥의 절점에서 수직변위가 증가 할수록 아웃리거트러스의 붕괴 메카니즘이 발생한다. 이러한 아웃리거의 붕괴 메카니즘에 의하여 그림 3의 (a)처럼 초대형기둥과 아웃리거 시스템의 최대 하중계수는 약 0.2로 연쇄붕괴에 아주 취약한 것으로 나타났다.

아웃리거와 벨트트러스를 함께 설치하면 아웃리거의 끝단에 위치한 기둥들과 함께 주변의 다른 기둥들도 아웃리거를 구속하게 된다. 따라서 비정상하중에 의하여 1층 기둥의 일부가 파괴되더라도 최상층의 아웃리거와 벨트트러스에 의하여 제거된 기둥이 지지하던 하중을 구조물 전체로 고루 재분배시킬 수 있다(그림 3(b)).



(a) 초대형기둥과 아웃리거 시스템 (b) 벨트트러스와 아웃리거 시스템

그림 3. 힘-변위 관계

4. 결론

초대형기둥과 아웃리거 시스템에서 1층 초대형기둥이 제거될 경우 제거된 기둥이 지지하던 하중은 아웃리거에 집중되게 된다. 그 결과 아웃리거트러스의 압축력을 받는 부재가 좌굴이 발생하여 중력하중을 지지할 수 없게 되었다. 예제모델의 Pushdown해석 결과에 의하면 최대하중계수가 약 0.2로 나타났다.

그러나 벨트트러스와 아웃리거 시스템은 1층 기둥이 제거되어도 최상층에 설치된 벨트트러스에 의하여 구조물 전체로 중력하중이 재분배 되기 때문에 연쇄붕괴에 대한 저항능력이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 초고층구조물의 연쇄붕괴에 대한 저항능력을 증가시키기 위하여 다음과 같은 방법을 제시할 수 있다.

(1) 벨트트러스와 같이 구조물 전체로 하중을 재분배 시킬 수 있는 구조물을 설치한다.
(2) 아웃리거층의 부재를 연성능력이 우수한 부재로 한다.
(3) 아웃리거의 설계시 중력하중을 고려하여 설계한다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임 (No. R0A-2006-000-10234-0)

참고문헌

GSA, “Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects,” The U.S. General Services Administration, 2003.

DoD, Unified Facilities Criteria (UFC), “Design of Buildings to Resist Progressive Collapse,” Department of Defense, 2005.

Marjanishvili, S. M., Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse, Journal of Performance of Constructed Facilities, pp. 79-85, 2004.

Khandelwal, K., El-Tawil, S., “Catenary Action during Collapse of Steel MRF Buildings,” Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety Proceedings of the 2006 Structures Congress St. Louis, Missouri, USA.