

강성등가하중을 이용한 등가정적 연쇄붕괴 해석

Equivalent Static Analysis of Progressive Collapse Using Equivalent Load for Stiffness

황영철* · 김계중** · 김치경***

Hwang, Young-Chul · Kim, Gye-Joong · Kim, Chee-Kyeong

ABSTRACT

The goal of this paper is to develop a rational static analysis method which consider efficiently the dynamic effect of the gravity load following sudden removal of key element. For this goal this paper introduce the equivalent load for element stiffness which is a preceding research result and will develop equivalent static analysis which will be able to predict the maximum behavior considering dynamic effect. Some examples are provided to verify it. Equivalent static analysis is compared with the analysis method which is recommended by the GSA2003 guidelines and the time-history analysis which is the most accurate for dynamic behavior.

Keywords: *Progressive collapse, equivalent load for element stiffness, equivalent static analysis, Time-History analysis*

1. 서론

연쇄붕괴란 충격하중 또는 폭발하중 등 내, 외부의 비정상하중에 의하여 구조부재의 초기 국부파괴가 연쇄적으로 전달되어 파괴되는 현상을 말한다. 2001년 뉴욕의 World Trade Center의 테러 이후에 이런 연쇄붕괴에 대한 관심이 고조되었고, GSA(General Services Administration)와 DoD(Department of Defense)등의 기관에서는 GSA 2003, DoD 2005로 연쇄붕괴 해석과 설계에 대한 가이드라인을 발표하였다(GSA, 2003; DoD 2005).

이 가이드라인에서는 구조물의 연쇄붕괴해석을 수행하기 위하여 대체경로법(Alternate Path method)을 기본적으로 제시하고 있다. 이 방법은 부재가 한계상태에 도달하면 제거한 후 나머지 구조요소들이 그로 인한 하중을 부담할 수 있는지 확인하는 절차이다. 즉 제거된 부재의 하중을 인접 부재로 재분배하고 하중이 수정된 부분에서 해석을 재수행하여야 한다. 또한 부재의 허용기준안에 들어 올 때까지 재설계하여 재해석을 하고 이 전체 과정을 계속 반복 수행한다.

본 연구에서는 선행 연구결과와 하나로서 부분적인 형상변경이 있을 경우 전체 구조물을 재해석하지 않고

* 학생회원 · 신문대학교 건축공학과 석사과정 Email: young292@gmail.com

** 학생회원 · 신문대학교 건축공학과 석사과정 Email: kingj12@naver.com

*** 정회원 · 신문대학교 건축학부 교수 Email: ckim@sunmoon.ac.kr

변경이 있는 부분만을 부분 해석하는 기법을 개발함으로써 부분 변경 구조물을 매우 효율적으로 해석할 수 있는 “강성등가하중을 이용한 재해석 기법”(김치경, 2004; 김치경, 2006)을 발표한바 있다.

이 논문에서는 부재의 순간 파괴에 따른 중력하중의 동적효과를 합리적으로 고려하여 부재의 순간 파괴에 따른 동적 거동을 고려하였다. 동적 효과를 고려하기 위한 정해는 파괴 부재가 지지하던 중력하중을 순간적으로 제거한 후의 구조물 거동을 동적해석, 즉 시간이력해석을 수행하는 것이라 할 수 있다. 하지만 시간이력해석의 계산량 부담을 고려할 때 주요부재를 바뀌며 일일이 동적해석을 수행하고 그 결과를 취합함은 현업 적용성 측면을 고려할 때 비현실적이라 하겠다. 본 논문에서는 순간 파괴를 고려해야 할 각 부재를 강성등가하중으로 표현하고, 부재 순간파괴의 동적 효과를 고려하여 이 하중을 2배로 함으로써 동적해석 시 산출되는 구조물의 최대변위를 정확히 예측할 수 있을 것이라는 가설을 가지고 해석모델에 적용하여 정적 해석한 결과와 비교 하였다.

2. 강성등가하중

선행 연구로 김치경(김치경, 2006)은 강성등가하중의 정의와 응용에 대해서 발표를 했다. 본장에서는 강성등가하중의 기본 개념에 대하여 요약, 기술한다.

2.1 정의

강성등가하중이란 각 부재 강성 또는 부분 강성이 구조물의 전체 거동에 미치는 영향을 등가의 절점하중으로 치환한 하중으로 정의된다. 즉 초기 구조물에 부재의 침식 또는 기존 부재의 단면 변경에 의한 강성 변화가 발생되어 재해석이 필요할 때, 초기 구조물의 강성행렬을 그대로 사용하되 부분적 강성 변경과 동일한 효과를 갖는 절점하중을 구하여 추가함으로써 구조물 강성행렬의 재구성 및 역행렬 제계산 없이 강성 변경의 영향을 반영할 수 있다.

2.2 강성변경부분과 강성고정부분의 구분

전체 구조물의 강성행렬은 강성고정부분과 강성변경부분의 강성행렬을 결합하여 구성할 수 있다. 이 때 강성고정부분의 강성행렬은 잔류자유도만 남기고 나머지 자유도는 소거한 부구조물로 만든다. 잔류자유도만으로 구성되는 전체 구조물의 평형방정식은 식 (1)로 구성되고, 구조물 강성행렬은 식 (2)에 보는 바와 같이 강성변경부재들의 부재강성행렬의 합 K^c 와 잔류자유도로 응축된 강성고정부분 부구조물의 강성행렬 \bar{K}^u 로 구분할 수 있다.

식 (1)와 같이 평형방정식을 잔류자유도로 응축시킴으로써 방정식 수를 구조물 자유도 수에서 강성 변경이 발생한 요소가 직접 연결되어 있는 자유도 수로 줄일 수 있다.

$$\bar{K}u_a = \bar{r}_a \quad (1)$$

$$\bar{K} = \bar{K}^u + K^c \quad (2)$$

$$K^c = \sum_{i=1}^{M_c} K^{(i)} \quad (3)$$

\bar{K}^u : 잔류자유도로 응축된 구조물 강성행렬

\bar{K} : 잔류자유도로 응축된 강성고정부분 강성행렬

$K^{(i)}$: i 부재의 부재강성행렬

\bar{r}_a : 잔류자유도로 응축된 하중벡터

u_a : 잔류자유도로 구성되는 변위벡터

M_c : 강성 변경 부재 수

2.3 강성변경부재 응력 계산

강성 변경 후 잔류자유도로 응축된 평형방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$(\tilde{\mathbf{K}}^c + \bar{\mathbf{K}}^c) \tilde{\mathbf{u}}_c = \tilde{\mathbf{r}}_c \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}^c = \sum_{i=1}^{M_c} \tilde{\mathbf{K}}^{(i)c} \quad (5)$$

$\tilde{\mathbf{K}}^{(i)c}$: i 부재의 강성 변경 후 부재강성행렬

$\tilde{\mathbf{r}}_c$: 잔류자유도로 응축된 하중벡터

$\tilde{\mathbf{u}}_c$: 강성변경 후 잔류자유도 변위벡터

잔류자유도로 응축된 하중벡터 $\tilde{\mathbf{r}}_c$ 는, 초기해석에서 계산된 잔류자유도에 대한 변위벡터 \mathbf{u}_c 와 잔류자유도에 대한 구조물 강성행렬 $\bar{\mathbf{K}}$ 를 식 (1)에 대입하여 쉽게 계산할 수 있다.

식 (4)을 이용하여 강성변경 후 잔류자유도에 대한 변위벡터 $\tilde{\mathbf{u}}_c$ 는 식 (6)에 의하여 계산할 수 있고, i 번째 강성변경부재의 변경 부재력 $\tilde{\mathbf{f}}^{(i)c}$ 는 식 (7)에 의하여 계산된다.

$$\tilde{\mathbf{u}}_c = (\tilde{\mathbf{K}}^c + \bar{\mathbf{K}}^c)^{-1} \tilde{\mathbf{r}}_c \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{f}}^{(i)c} = \tilde{\mathbf{K}}^{(i)c} \tilde{\mathbf{u}}_c, \quad i=1, \dots, M_c \quad (7)$$

2.4 강성증가하중 계산

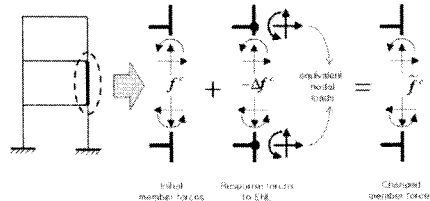


그림 1 강성증가하중 크기 산정 원리

그림 1은 강성 변경 전 f^c 의 부재력이 작용하던 부재에 강성 변경이 발생하는 경우 강성증가하중을 산정하는 원리를 보여준다. 이 때 해당 부재에는 강성 변경에 따른 $\Delta \mathcal{V}^c$ 의 부재력 변화가 발생하고 그 연결부에는 작용-반작용 원리에 따라 $-\mathcal{V}^c$ 의 응력이 발생된다. 이러한 상황은 강성 변경 전 구조물의 연결부 절점에 적절한 강성증가하중을 작용시켜 연결부에 $-\mathcal{V}^c$ 의 응력이 분배되도록 함으로써 재현 가능하다. 이 때 강성증가하중이 추가된 강성 변경 전 구조물의 기동은 강성 변경 후 구조물의 기동과 동일하게 된다.

초기해석에서 구한 부재력 $f^{(i)c}$ 와 식 8로 계산된 강성 변경 후 부재력 $\tilde{f}^{(i)c}$ 로부터 부재력 변화량 벡터 $\Delta \mathcal{V}^c$ 를 계산한다.

$$\Delta \mathcal{V}^c = \sum_{i=1}^{M_c} (\tilde{f}^{(i)c} - f^{(i)c}) \quad (8)$$

변경 전 강성고정부분의 잔류자유도에 $\Delta \mathcal{V}^c$ 의 힘이 추가로 작용되도록 하기 위한 잔류자유도 절점하중 $\Delta \mathbf{r}_c$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{K}}^c \bar{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{r}_c = -\Delta \mathcal{V}^c \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{r}_c = (\bar{\mathbf{K}}^c \bar{\mathbf{F}})^{-1} (-\Delta \mathcal{V}^c) \quad (10)$$

3. 동가정적 연쇄붕괴 해석

3.1 동적 거동을 고려한 정적해석 개요

GSA2003에서는 연쇄붕괴에 의한 순간파괴의 동적 효과를 고려하기 위해 하중을 $2(DL+0.25LL)$ 으로 적용하여 해석을 수행하도록 권고하고 있다. 즉 동적 효과를 고려하기 위하여 정적 하중을 2배의 하중을 전 경간에 적용한 것이다. 이것은 과대설계를 유도할 수 있고 또한 많은 선행연구에서 이 문제를 제시했었다(Powell G, 2005).

본 연구에서는 동적거동을 고려한 연쇄붕괴 해석방법으로 한 부재가 순간 파괴됨으로써 해당 부재가 지지하던 부재력의 2배에 해당하는 강성등가하중을 추가하여 해석함으로써 보다 합리적이고 효율적인 연쇄붕괴 해석기법을 제안한다. 본 장에서는 GSA2003에서 제시된 방법과 본 연구에서 제안하는 동가정적 연쇄붕괴 해석 결과를 시간이력해석 결과와 비교하여 본 기법의 합리성과 효율성을 검증한다.

3.2 해석 예제

예제모델은 그림 2같이 철골조 4경간의 15층으로 2차원 모델이다. 하중은 각 경간마다 고정하중으로 60kN을 사용하였으며, SM400 강재를 표 1같이 설계하였다. 연쇄붕괴의 거동을 알아보기 위하여 1층 외부기둥, 두 번째 기둥, 그리고 중간 기둥을 제거하였고, MIDAS GEN(마이더스 아이티, 2003)를 이용한 시간이력 해석결과와 동가정적 연쇄붕괴 해석, GSA 정적해석들의 결과를 그림 4 이후에 제시하였다.

시간이력 해석은 제거될 기둥에 가해지는 부재력을 산정하고 그림 3에 주어진 바와 같이 순간 파괴되는 부재에 작용하던 부재력 P, V, M과 구조물에 작용하는 중력하중 W를 점진적으로 가하여 파괴 직전 파괴형상을 재현하고, 부재력 P, V, M을 순간 제거한 후 시간이력을 수행하였다. (Kaewkulchai 2003)

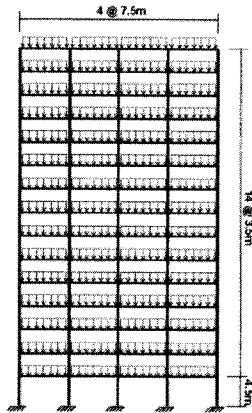


그림 2 해석 모델

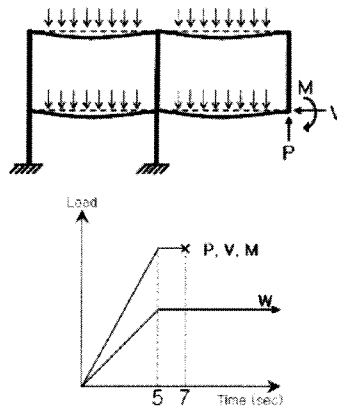


그림 3 연쇄붕괴 해석을 위한 동적하중 가력방법

표 1 해석 모델의 부재 크기(mm)

층/부재	1층 ~ 3층	4층 ~ 6층	7층 ~ 9층	10층 ~ 12층	13층 ~ 15층
기둥	H 400×408×21×21	H 350×357×19×19	H 344×354×16×16	H 298×299×9×14	H 248×249×8×13
보	H 450×200×9×14	H 500×200×10×16	H 496×199×9×14	H 400×200×8×13	H 396×199×7×11

3.3 해석 결과

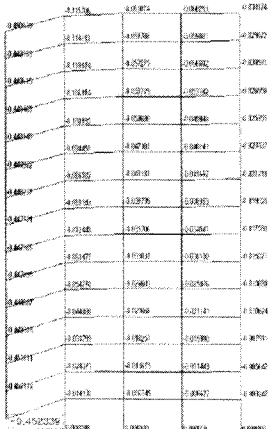


그림4 첫 번째 기동 Time-History 변형

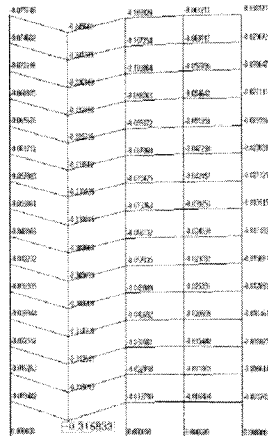


그림7 두 번째 기동 Time-History 변형

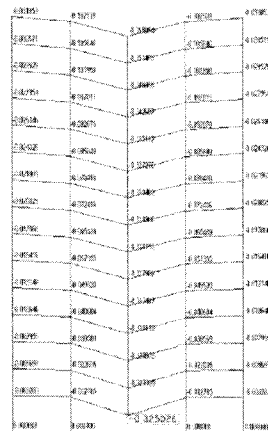


그림10 중간 기동 Time-History 변형

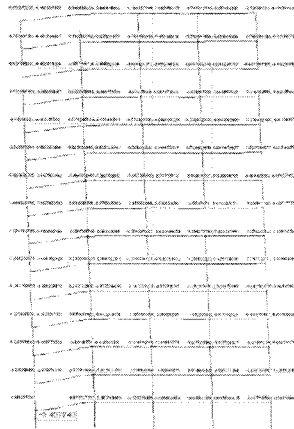


그림5 첫 번째 기동 등가정적 변형

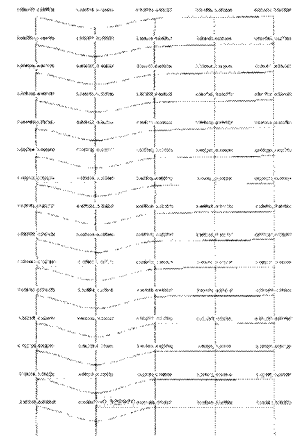


그림8 두 번째 기동 등가정적 변형

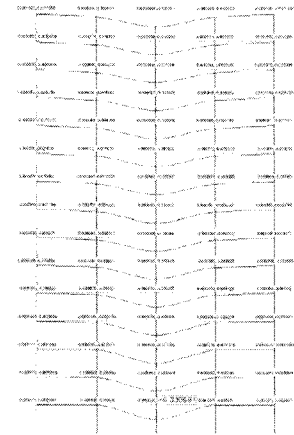


그림11 중간 기동 등가정적 변형

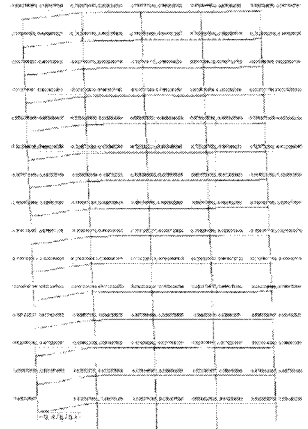


그림6 GSA2003 변형

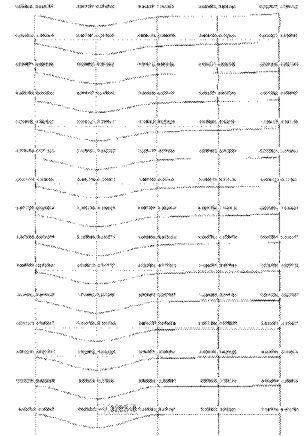


그림9 GSA2003 변형

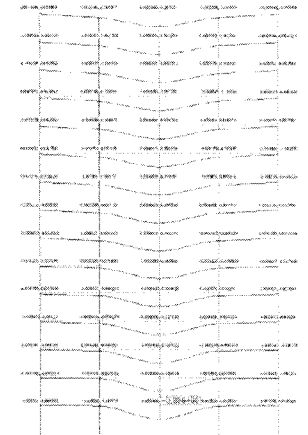


그림12 중간 기동 GSA 변형

4. 결 론

본 연구를 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 선행 연구 결과로 발표한 바 있는 강성등가하중을 이용하여 연쇄붕괴를 효율적으로 수행할 수 있는 정적해석기법을 제안하였다.
- 2) 각 부재의 강성을 하중으로 표현한 강성등가하중과 이를 부재 파괴 전 구조물에 가하여 부재파괴 후 거동을 산정하는 개념은 강성등가하중이 해당 부재에 발생하는 내력과 이에 의한 지지효과를 제거하는 물리적 의미를 갖는다. 그러므로 부재 순간 파괴에 따른 동적거동을 반영하기 위하여 강성등가하중을 2 배로 함은 매우 타당한 가설로 판단된다.
- 3) 동적해석 결과를 정해로 설정하고 시간이력해석에 의한 최대 변위 및 응력결과를 GSA에서 제시하고 있는 동적증폭계수 2배를 전 경간에 적용한 해석 결과와 본 연구에서 제시하는 등가정적 연쇄붕괴해석에 의한 것과 비교한 결과, 본 연구의 해석기법이 시간이력해석 결과에 보다 근접한 해석 결과를 도출함을 확인하였다.
- 4) 등가정적 연쇄붕괴해석은 비선형정적해석, 비선형동적해석으로 확장할 수 있을 것으로 기대되며, 현재 본 연구진에서는 강성등가하중을 이용한 비선형 해석을 검토 중이며 성공적으로 수행될 경우, 이는 현장에서 실용적으로 활용할 수 있는 연쇄붕괴해석 기법의 개발을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심기술 연구개발사업(05건설핵심C03, 과제번호 C105A1000003-05A0300-00320)에 의한 것임

참고문헌

- 김치경 (2004) 부분적 강성 변화에 따른 효율적 부분 재해석 알고리즘, 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp.459~467.
- 김치경 (2006) 강성등가하중의 정의와 응용, 한국전산구조공학회 논문집, 19(3), pp303~312.
- (주)마이다스아이티 (2003) MIDAS로 배우는 구조역학, DOOANS COMMUNICATION, pp.302~325.
- Bathe, K.J. (1996) Finite Element Procedures, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Kaewkulchai G. and Williamson E. B. (2003) Dynamic Behavior of planar Frames during Progressive Collapse, 16th ASCE Engineering Mechanics Conference.
- Powell G (2005) Progressive Collapse: Case study Using Nonlinear Analysis, Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium April 20-24, New York.
- The U.S. General Services Administration(GSA) (Jun 2003) Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, GSA
- Unified Facilities Criteria (UFC) DOD (January 2005) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, UFC4-023-03, Department of Defense.