

가새골조의 연쇄붕괴 저항성능

Progressive Collapse Resisting Capacity of Braced Frames

김진구† 이영호* 최현훈**

Kim, Jin-Koo Lee, Young-Ho Choi, Hyun-Hoon

(논문접수일 : 2008년 2월 29일 ; 심사종료일 : 2008년 9월 24일)

요지

본 논문에서는 비선형 정적해석 및 동적해석을 이용하여 가새골조의 연쇄붕괴 저항능력을 평가하였다. 모두 아홉 개의 서로 다른 가새 형태를 고려하였으며, 모멘트골조의 해석 결과와 비교하였다. 비탄성 정적해석 결과에 따르면 현행 기준에 따라 설계된 지층 가새골조는 1층 중앙에 위치한 기둥이 제거될 경우 연쇄붕괴 저항성능 기준을 만족하는 것으로 나타났으나 대부분 취성적인 파괴모드를 나타내었다. 특히 압축가새가 좌굴한 후 인장가새가 인장력을 발휘하기 전에 취약한 층의 기둥이 좌굴하는 것으로 나타났다. Inverted-V형 가새골조의 경우가 가장 연성도 면에서 우수한 것으로 나타났다. 동적 해석 결과에 따르면 모든 가새골조는 중앙에 위치한 기둥이 제거될 경우 붕괴되지 않으며, 동일한 규모의 모멘트 저항골조에 비해 진동이나 처짐량이 작은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 연쇄붕괴, 특수 중심 가새골조, 비선형해석

Abstract

In this study the progressive collapse potential of braced frames were investigated using the nonlinear static and dynamic analyses. All of nine different brace types were considered along with a special moment-resisting frame for comparison. According to the pushdown analysis results, most braced frames designed per current design codes satisfied the design guidelines for progressive collapse initiated by loss of a first story mid-column; however most model structures showed brittle failure mode. This was caused by buckling of columns after compressive braces buckled. Among the braced frames considered, the inverted-V type braced frames showed superior ductile behavior during progressive collapse. The nonlinear dynamic analysis results showed that all the braced frame model structures remained in stable condition after sudden removal of a column, and their deflections were less than that of the moment-resisting frame.

Keywords : progressive collapse, special concentrically braced frame, nonlinear analysis

1. 서론

최근 비정상 하중에 대한 구조물의 저항성능 평가 및 설계와 관련된 엔지니어들의 관심이 증가하고 있다. 일련의 연구결과들을 바탕으로 미국의 General Service Administration (GSA) 및 Department of Defence (DoD)에서는 건물의 연쇄붕괴 방지를 위한 해석 및 설계법에 대한 기준을 제시하였다. 이들 기준에서는 대체경로법(alternate pass method)을 기본적인 해석방법으로 채택하고 있다. 대체경로법은 임의의 기

둥을 제거하고 충격으로 인한 처짐의 증폭을 고려하기 위하여 정적 중력하중의 2배를 가하여 해석을 수행한 후 각 요소들의 한계상태를 확인하는 방법이다.

비정상 하중에 대한 구조물의 연쇄붕괴해석법은 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Crawford(2002)와 Suzuki(2003) 등은 구조물의 연쇄붕괴 저항성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제안하였다. 이렇듯 최근 구조물의 연쇄붕괴해석에 대한 다양한 연구가 진행되고 있지만 대부분의 연구가 모멘트저항골조의 응답분석에 국한되어 있다.

† 책임저자, 성균관대학교 건축공학과 부교수
Tel: 031-290-7655 ; Fax: 031-290-7570
E-mail: jkim12@skku.edu

* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사 후 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 12월 31일까지 본 학회에 보내주
시면 2009년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 횡하중 저항 시스템으로 주로 사용되는 가새 골조를 대상으로 가새의 설치형태에 따른 연쇄붕괴 저항성능을 비선형 정적해석법과 동적해석법을 이용하여 평가하였다.

2. 연쇄붕괴해석법

비정상 하중에 의한 구조물의 연쇄적인 붕괴 해석은 주요 구조부재가 파괴되는 시나리오를 예상하고 이 파괴가 연쇄붕괴로 이어질지에 대한 평가를 수행하는 방법이 주로 사용되고 있다. 현재 사용되고 있는 해석프로그램들을 이용하여 연쇄붕괴 현상을 간접적으로 고려할 수 있는 대표적인 방법은 GSA나 DoD의 가이드라인에서 제안하고 있는 정적해석법과 동적해석법이다. 정적해석법에서는 비정상 하중으로 인하여 임의의 기둥이 파괴되었을 때 해당 골조에 발생하는 순간적인 충격의 영향을 고려하기 위하여, 그림 1과 같이 기둥이 제거된 골조의 중력하중의 크기를 증가시켜 해석하는 방법을 사용하고 있다.

정적해석시 고려하는 고정하중(DL)과 적재하중(LL)의 크기는 GSA에서는 $2(DL+0.25LL)$ 의 하중조합을 적용하여 해석하고, DoD 기준에서는 중력하중 뿐만 아니라 풍하중(W)이 작용하는 상황까지 고려한 $2(1.2DL+0.5LL)+0.2W$ 의 하중조합을 적용하여 해석을 수행하도록 권고하고 있다. 이러한 하중조합에 대하여 전체 시스템의 연쇄붕괴 저항성능은 횡하중에 대한 구조물의 성능을 평가하기 위하여 사용되는 pushover 해석법을 응용한 pushdown 해석을 수행하여 평가할 수 있다. Pushdown 해석은 기둥이 제거된 위치(그림 1의 A점)의 수직변위를 조금씩 증가시키면서 그 때 필요한 하중을 계산하는 방식으로 진행된다. 이 하중은 앞서 언급한 하중조합을 기준으로 모든 위치의 하중을 동일한 비례로 증가시켜 결정한다. 따라서 수직변위가 점차적으로 증가함에 따라 모든 부재에 작용하는 하중도 동일한 비례로 증가한다.

반면 동적해석법은 중력하중의 크기를 증가시키지 않고 그림 2와 같이 모든 경간에 고정하중과 적재하중의 25%를 조합($DL+0.25LL$)한 중력하중을 가한다. 부재가 제거되기 전 이 부재에 작용하는 하중을 산정한 다음 그림 2와 같이 제거

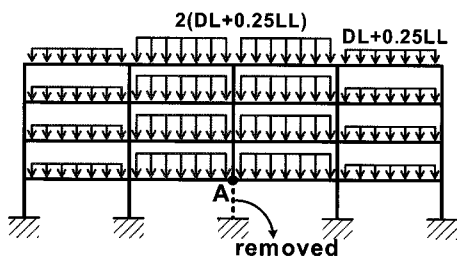


그림 1 비선형 정적해석시 작용하는 하중

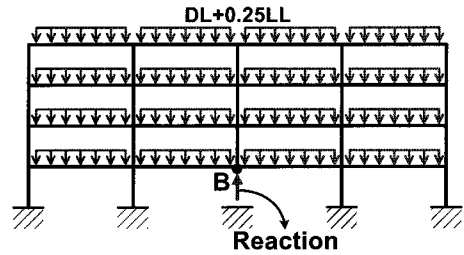


그림 2 비선형 동적해석시 작용하는 하중

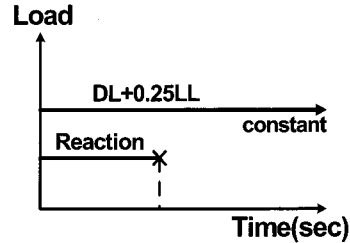


그림 3 연쇄붕괴 해석을 위한 동적하중 가력방법

되기 전 부재에 작용하던 하중을 기둥이 제거된 지점의 보-기둥 접합부(그림 2의 B점)에 반력으로 가해줌으로써 손상되기 전 구조물의 안정화된 상태를 구현할 수 있다. 이 때 고려하는 반력은 축력, 전단력과 모멘트이다. 이 상태에서 부재가 순간적으로 제거되는 현상을 구현하기 위해서 그림 3과 같이 일정 시간이 지난 후 반력을 순간적으로 제거하였다.

3. 예제 구조물과 모델링

3.1 예제 구조물의 설계

본 연구에서 사용된 가새골조는 AISC의 강도설계기준(AISC, 2000)과 철골건물의 내진기준(AISC, 2002)에 따라 특수 중심가새골조(SCBF)로 설계하였다. 가운데 경간에 가새가 설치된 3경간 가새골조의 경우(그림 4), 연쇄붕괴 해석 시 압축가새의 좌굴로 인하여 구조물 전체가 어느 한 방향으로 기울어진다. 따라서 가새의 능력을 평가하기 전에 기둥이 휨에 의하여 항복하기 때문에 구조물이 불안정한 상태가 된다(그림 5(a)). 또한 특수 모멘트저항골조를 가진 이중가새골조의 경우 모멘트골조의 영향으로 그림 5(b)와 같이 연쇄붕괴 저항성능이 크게 향상된다. 따라서 본 연구에서는 가새골조의 순수한 저항성능을 평가하기 위하여 보-기둥의 접합부가 전단접합으로 연결되고 내부 두 경간에 가새가 설치된 4층 4경간 가새골조를 대상으로 연쇄붕괴에 대한 저항성능을 파악하였다. 그림 6는 해석에 사용된 다양한 형태의 가새골조를 나타내며, 비교를 위하여 동일한 하중으로 설계된 특수 모멘트골조(SMRF)도 해석하였다(그림 6(h)).

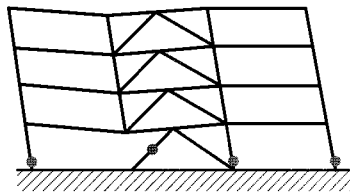
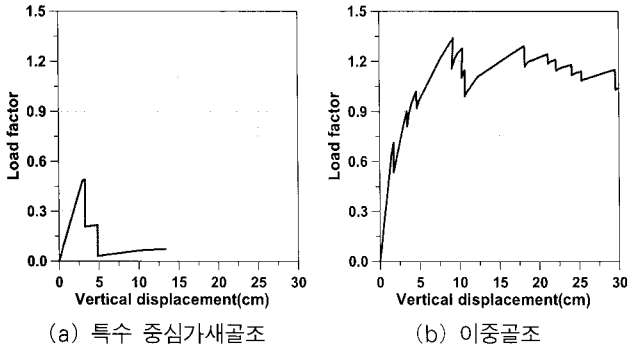


그림 4 내부기둥이 제거된 4층 3경간 가새골조의 거동



(a) 특수 중심가새골조

(b) 이중골조

그림 5 4층 3경간 역V형 가새골조의 pushdown 해석에 의한 힘-변위 곡선

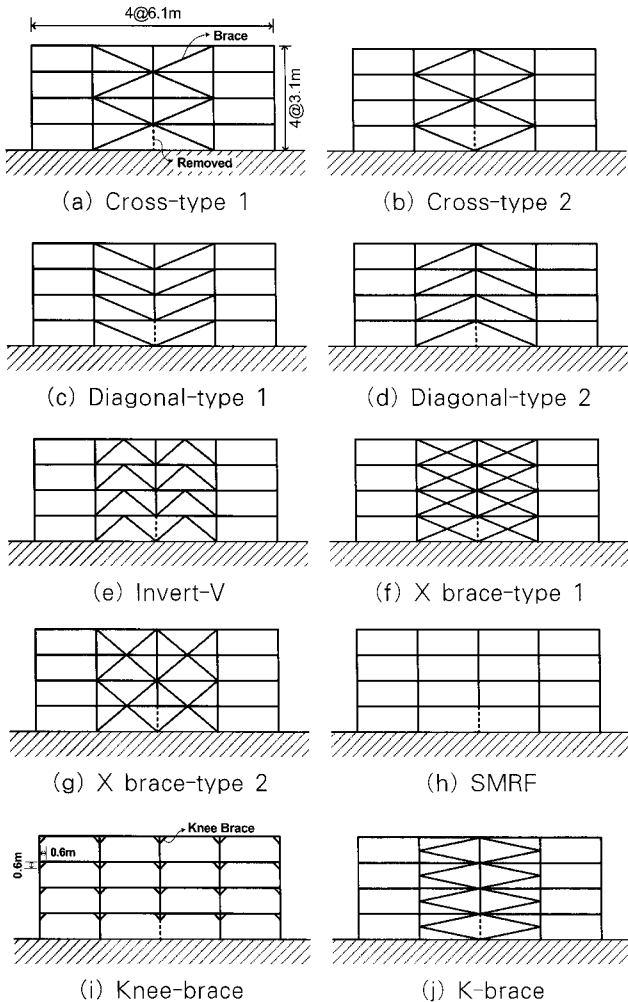


그림 6 가새의 설치형태 및 기둥제거 위치

표 1 예제 구조물의 설계 중력하중(kN/m²)

층수	고정하중	활하중
Roof	4.0	1.0
1~3층	4.3	2.4

표 2 역V형 가새골조의 부재크기

		1~2층	3~4층
기둥	외부	W5×19	W4×13
	내부	W8×40	W5×16
보	외부	W12×35	W12×35
	내부	W21×132	W21×122
가새		HSS4-1/2×4-1/2×0.3125	HSS4×4×0.3125

모든 층의 층고는 3.1m로 동일하고 경간의 길이는 6.1m이다. 가새의 설치형태는 그림 6에 나타난 것과 같이 한 절점에서 가새가 교차하는 형태(cross type), 대각가새(diagonal type), 역V형 가새(inverted-V type), X가새(X type), 보-기둥 접합부에 작은 가새가 설치된 형태(knee type)와 기둥의 중앙에서 가새가 교차하는 형태(K type)이다. 가새골조의 거동과 비교하기 위하여 동일한 규모의 특수 모멘트저항골조(SMRF)로 설계하였다.

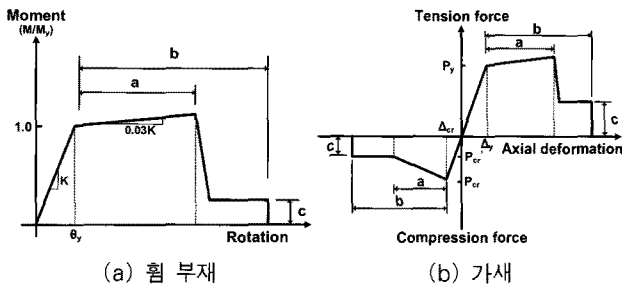
구조물의 설계는 MIDAS Genw를 이용하여 수행하였고 설계하중은 국내기준 및 ASCE 7-05에 따라 산정하였다. 중력하중은 표 1과 같다. 지진하중의 크기는 지반조건은 S_D , 가속도계수 S_5 와 S_1 는 각각 1.5와 0.6을 사용하였고, 지반계수 F_v 와 F_h 는 1.0과 1.5를 사용하였다. 특수 중심가새골조의 반응수정계수는 6, 특수 모멘트저항골조는 8, Knee-brace가 설치된 골조는 반응수정계수 3을 사용하였다.

기둥과 보는 ASTM A992 강재를 사용하였고 가새 부재는 A500-46을 강재로 된 각형강관을 사용하였다. 예제 구조물들 중 역V형 가새골조의 부재크기는 표 2와 같다.

3.2 예제 구조물의 모델링

비선형 정적 해석을 수행하기 위하여 부재의 힘-변형 관계는 항복이후 최대 저항력에 도달한 이후 저항 성능이 감소되는 그림 7과 같은 이력모델을 사용하였다. 연쇄붕괴에 관한 GSA 기준에서는 철골부재 및 전체시스템의 변형한계에 대하여 표 3과 같이 규정하고 있지만, 부재의 폭두께비나 보-기둥 접합의 형태에 따라 상세하게 분류되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 부재의 폭두께비와 하중형태에 따라 부재의 상태를 상세하게 규정하고 있는 FEMA-356의 기준에 따라 부재의 이력곡선을 모델링하였다.

FEMA-356의 식 (5-2)에 따르면 기둥의 항복 회전각(θ_y)



(a) 휨 부재 (b) 가새

그림 7 휨 부재와 가새의 이력모델

표 3 GSA에 정의된 철골 부재의 한계 변형

부재	연성도(μ)	회전각(θ , radians)
철골보	20	0.21
철골기둥(인장제어)	20	0.21
철골기둥(압축제어)	1	-

은 작용하는 축력에 따라 달라진다. 본 연구에서는 GSA의 하중조합에 의해 발생하는 기둥의 축력을 이용하여 항복 회전각을 산정하고 각 변형단계별 계수(그림 7(a)의 계수 a, b, c)를 산정하였다. 또한 기둥의 경우 축력-모멘트 상호작용을 고려하여 모델링하였다.

가새의 거동은 그림 7(b)와 같이 압축 좌굴이후 강성이 저감되고, 잔류강도(P_{cr}')는 각형강관의 판폭두께비에 따라 좌굴강도(P_{cr})의 40% 또는 20%로 하였다. 부재의 항복 후 강성비는 초기 강성의 3%로 가정하였고, 보-기둥 접합부는 편접합으로 모델링하였다. 보-기둥 접합부의 전단파괴는 발생하지 않는다고 가정하고 해석을 수행하였다.

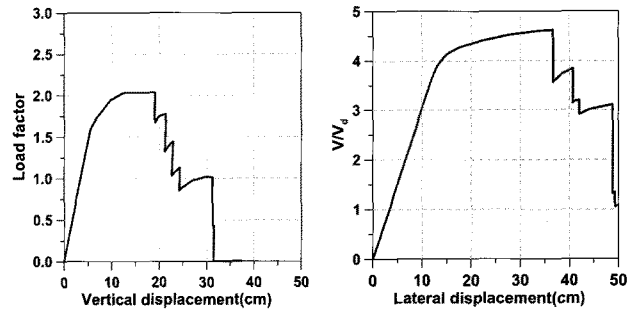
비선형 동적해석을 수행하기 위하여 제거할 기둥의 접합부에 가한 반력을 해석이 시작되고 5초 후에 제거함으로써 구조물의 수직방향 진동이 발생하도록 하였다. 구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였다.

4. 연쇄붕괴 해석결과

4.1 비선형 정적해석

구조물의 연쇄붕괴 저항성능을 평가하기 위하여 범용 해석 프로그램인 SAP 2000을 이용하여 그림 6에 나타난 것과 같이 1층 중앙에 위치한 기둥을 제거한 2차원 골조 구조물의 비선형 정적해석과 동적해석을 수행하였다.

비선형 정적해석인 pushdown 해석은 기둥이 제거된 위치의 수직방향 변위를 증가시키면서, 각 변위 단계에서 그림 1과 같이 구조물에 재하되는 하중패턴에 대한 비(load factor)를 구하는 일련의 과정이다. 만약 최대 하중계수(load factor)가 1보다 작으면 비선형 정적해석에 대한 중력하중 조합인



(a) Pushdown 곡선 (b) Pushover 곡선

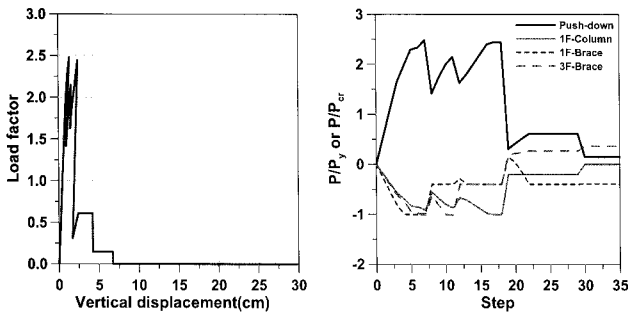
그림 8 SMRF의 pushdown 및 pushover 해석결과

2(DL+0.25LL)에 의한 하중에 저항하지 못함을 의미한다.

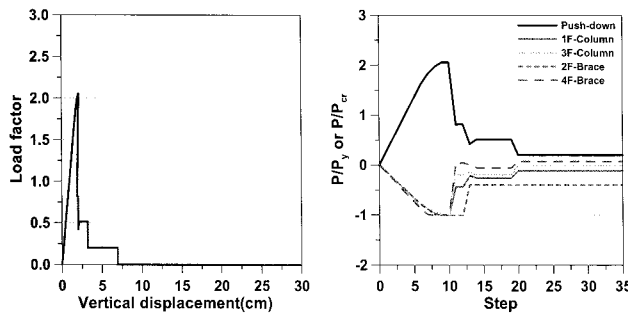
특수 모멘트저항골조의 연쇄붕괴 저항성능을 살펴보면 그림 8(a)와 같이 최대 하중계수가 약 2로 상당히 큰 내력을 보유하고 있음을 알 수 있다. 이는 모멘트저항골조의 경우 주요 설계변수가 각 부재의 강도가 아니라 횡하중에 대한 횡변위이므로, 강도면에서 상당한 여유를 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다. 또한 철골 모멘트저항골조의 연쇄붕괴 저항성능을 평가한 김진구와 김태원(2007)의 연구결과에 따르면 제거된 기둥을 중심으로 좌우가 대칭인 경우 제거된 기둥의 양쪽 골조가 똑같이 저항하고 모든 보에 소성힌지가 발생할 때까지 하중계수는 증가함을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 해석 모델은 내진상세에 따른 강기둥-약보 요구를 충족하도록 설계하였기 때문에 기둥에서는 소성힌지가 발생하지 않았다. 이러한 모멘트저항골조의 성능은 횡하중에 대한 pushover 해석에 의한 결과를 나타낸 그림 8(b)에서도 확인할 수 있다. 횡하중에 대하여 충분한 연성거동을 하도록 현행 설계기준과 내진상세를 적용하여 설계할 경우 상당한 연쇄붕괴 저항성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

가새골조의 거동은 제거된 기둥을 중심으로 대칭이기 때문에 기둥의 경우 모멘트에 의한 휨 파괴보다 축력에 의한 압축 좌굴모드를 형성하였다. 가새의 인장 항복과 압축 좌굴이 전체 시스템의 거동에 미치는 영향을 살펴보면 그림 6(d)와 같이 모든 가새가 압축력을 받는 경우 가새부재의 좌굴이 발생한 이후 기둥의 좌굴이 발생하였지만, 그림 6(c)와 같이 모든 가새가 인장력을 받는 경우 가새의 인장 항복에 도달하기 전 기둥의 좌굴로 인하여 골조의 저항능력이 떨어져 구조물의 거동이 불안정하게 된다. 본 연구의 예제 구조물은 제거된 기둥의 양쪽에 가새가 설치되어 있기 때문에 모든 가새골조의 하중계수는 1보다 크게 나타났다. 가새 설치 형태별로 구조물의 수직방향 소성거동을 살펴보고, 횡방향 지진하중에 대한 구조물의 소성거동과 비교·분석하였다.

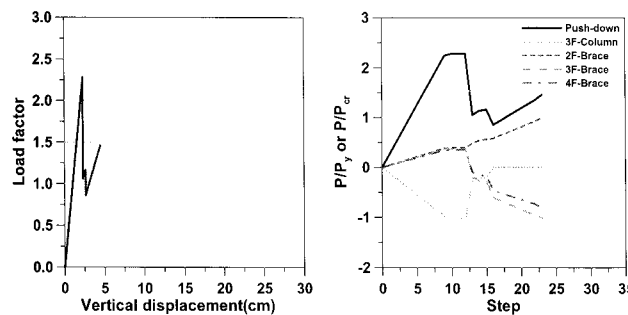
그림 6(a)~(b)와 같은 Cross type의 가새가 설치된 골조의 응답을 나타낸 그림 9과 10에 따르면 Cross-type 1의



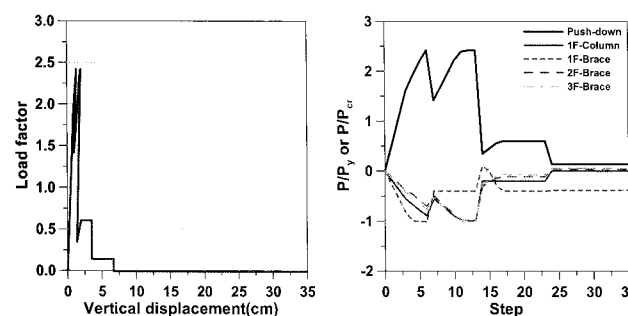
(a) Pushdown 곡선 (b) 부재별 응답
그림 9 Cross-type 1 의 수직방향 힘-변위 관계



(a) Pushdown 곡선 (b) 부재별 응답
그림 10 Cross-type 2 의 수직방향 힘-변위 관계

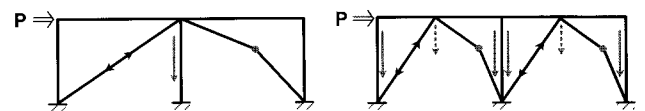


(a) Pushdown 곡선 (b) 부재별 응답
그림 11 Diagonal-type 1의 수직방향 힘-변위 관계

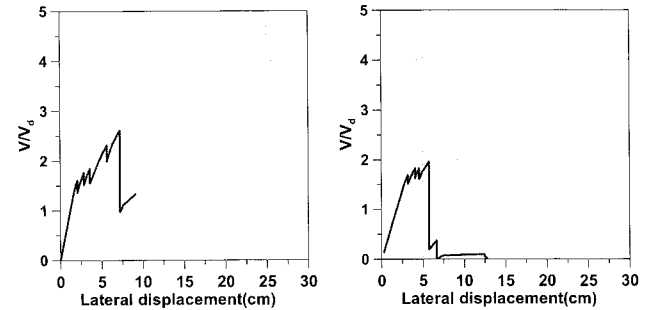


(a) Pushdown 곡선 (b) 부재별 응답
그림 12 Diagonal-type 2 의 수직방향 힘-변위 관계

경우 그림 9(b)와 같이 1층과 3층의 가새가 먼저 좌굴 ($P/P_{cr} = -1$)하고 그 후에 기둥이 좌굴하는 것으로 나타났다. 반면 Cross-type 2의 경우는 가새와 기둥의 좌굴이 동



(a) 한쪽 기둥 집중 (b) 양쪽 기둥 분배
그림 13 pushover 해석시 가새 좌굴 이후 하중의 분배



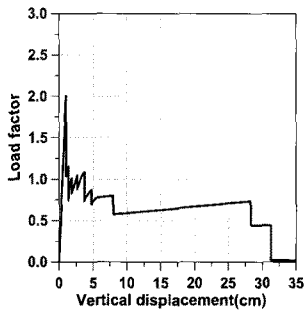
(a) Cross-type 2 (b) Diagonal-type 1
그림 14 Cross와 Diagonal 가새골조의 pushover 곡선

시에 발생하는 것으로 나타났다. 여기서 부재별 응답은 전체 시스템의 응답이 제거된 기둥을 중심으로 양쪽이 대칭이기 때문에 제거된 기둥의 왼쪽에 있는 기둥과 가새 부재 중 좌굴이나 항복이 발생한 부재의 각 해석 단계(step)별 부재력을 항복하중(P_y)이나 좌굴하중(P_{cr})으로 나눈 값으로 나타내었다.

Diagonal-type 1의 경우는 연쇄붕괴 해석시 모든 가새 부재가 인장력을 받는 부재이므로 그림 11(b)와 같이 가새가 인장항복에 도달하기 전에 기둥의 축력이 보다 빠르게 증가하여 3층 기둥에서 좌굴이 발생하였다. 기둥의 좌굴 이후 하중의 재분배로 인하여 3층과 4층의 가새가 압축력을 받았다. Diagonal-type 2의 경우는 1층의 가새가 먼저 좌굴하고 상부층의 하중이 가새를 통하여 양쪽의 기둥으로 전달되면서 기둥의 좌굴이 발생하였다(그림 12(b)).

Cross형태와 Diagonal형태의 가새골조에 대한 횡방향 pushover해석결과에 따르면 두 시스템 모두 가새의 좌굴 이후 그림 13(a)와 같이 같은 층 인장가새의 인장력이 한쪽 기둥으로 집중되면서 기둥의 좌굴이 발생하여 구조물의 저항 성능이 급격히 떨어지는 취성적인 거동을 보였다(그림 14). 반면 Invert-V 가새 형태의 경우에는 그림 13(b)와 같이 압축가새 좌굴 이후 인장가새의 인장력을 보가 받아 양쪽 기둥에 분배하면서 기둥의 좌굴 없이 가새가 인장력을 발휘할 수 있었다(그림 15(b)).

Inverted-V의 경우 그림 15(b)~(c)에서 볼 수 있듯이 앞선 두 시스템의 거동과 비슷하게 압축 가새의 좌굴에 이어 취약한 기둥의 좌굴이 발생하지만, 인장 가새의 저항력이 충분히 발휘될 때까지 보가 양쪽 가새에 작용하는 하중의 불균



(a) Pushdown 곡선

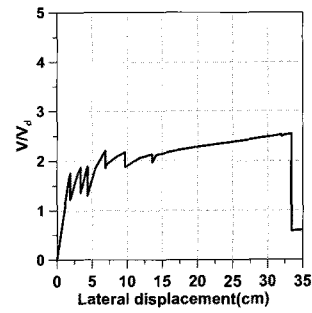
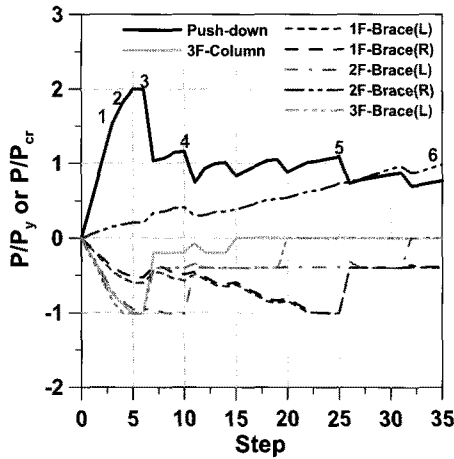
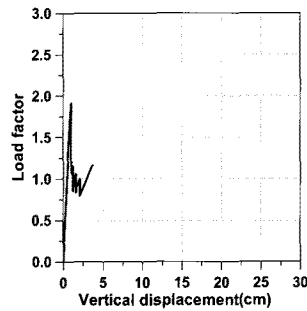


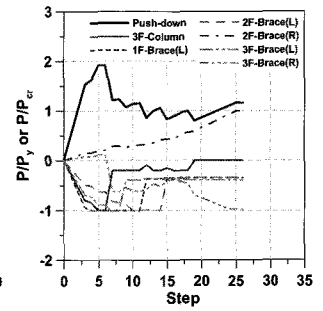
그림 16 Inverted-V 모델의 pushover 곡선



(b) 부재별 응답

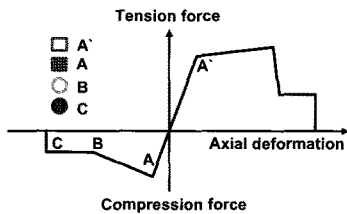
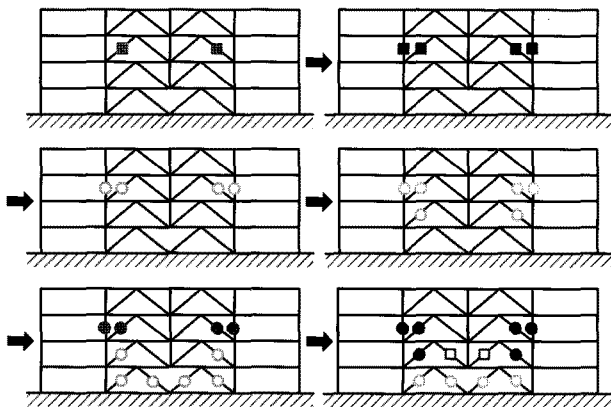


(a) Pushdown 곡선



(b) 부재별 응답

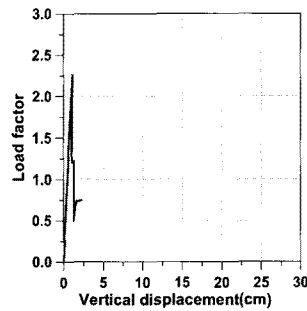
그림 17 X brace-type 1의 수직방향 힘-변위 관계



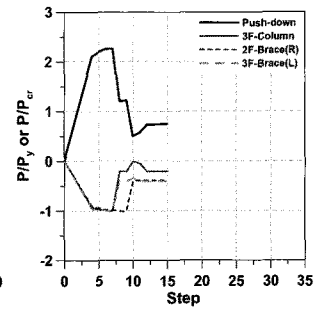
(c) 하중 단계별 소성한지 분포

그림 15 Inverted-V의 수직방향 힘-변위 관계

형력에 저항하여 파괴되지 않은 기둥으로 하중을 전달하여 연쇄붕괴에 저항하게 된다. 따라서 다른 가새골조의 경우 초기 하중계수의 저감이후 저항능력이 거의 없는 반면에 Invert-V 가새골조는 초기 하중계수의 저감이후에도 상당한



(a) Pushdown 곡선



(b) 부재별 응답

그림 18 X brace-type 2의 수직방향 힘-변위 관계

연쇄붕괴 저항성능을 보유한 것으로 나타났다. 이러한 거동은 하중의 방향은 다르지만 그림 16의 지진하중에 대한 pushover 해석결과에서도 확인할 수 있다.

X-brace-type 1의 경우는 Cross 형태나 Diagonal 형태와 유사하게 기둥이 좌굴하고 인장을 받던 가새가 압축력을 받아 좌굴하면서 불안정한 구조물이 되는 것으로 나타났다(그림 17(b)). X-brace-type 2의 경우도 가새와 기둥의 좌굴에 의해 파괴모드를 형성하는 것으로 나타났다(그림 18(b)).

K-brace는 지진하중에 대한 횡하중저항 시스템으로 사용되고 있지 않지만 다른 가새골조 시스템과의 비교를 위하여 해석을 수행하였다. 해석결과 역V형 일반가새골조에서 보의 거동과 유사하게 압축 가새의 좌굴 이후 인장과 압축 가새의 하중 사이의 불균형력 때문에 기둥에 휨 항복이 발생하고 결과적으로 해석 모델중 가장 작은 강도를 보였다(그림 19(a)).

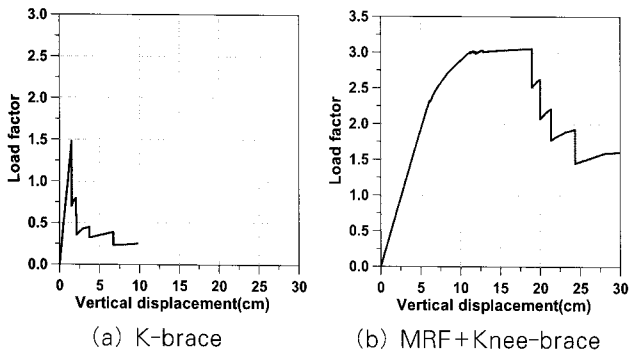


그림 19 가새골조의 수직방향 힘-변위 관계

모멘트골조에 Knee-brace가 설치된 경우는 기타골조로 가정하고 반응수정계수 3을 사용하여 지진하중을 산정하고 설계하였고 내진상세 규정은 적용하지 않았다. 해석 결과를 나타낸 그림 19(b)에 따르면 Knee-brace시스템은 상당한 저항내력을 보유하고 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 8(a)의 특수 모멘트저항골조의 pushdown 곡선과 비교해볼 때, 모멘트골조와 조합한 Knee-brace의 하중계수는 더욱 크게 평가됨을 알 수 있다.

4.2 비선형 동적해석

비선형 동적해석은 그림 2와 같은 중력하중을 재하하고 기둥이 제거되기 전 작용하는 하중을 제거될 위치의 절점(그림 2의 B)에 반력으로 입력하였다. 그림 3과 같이 반력을 시간이력해석이 시작되고 5초 후에 제거하여 구조물이 수직 방향으로 자유진동하도록 하였다.

동적해석 결과에 따르면 예제 모델 모든 경우에 있어서 탄성 거동을 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 정적 pushdown 해석 결과 하중계수가 2 보다 크거나 근접한 값을 나타낸 것에서 어느 정도 예상된 결과라 할 수 있다. 기둥이 제거될 때 충격으로 인하여 구조물의 상하방향 진동이 발생하고 한 변위에 수렴하였다. 동적해석에서 구한 최종 변위는 기둥을 제거하고 DL+0.25LL의 중력하중에 대한 정적해석의 변위(수평 점선)와 일치하였다. 예제 구조물들 중 기둥이 제거된 지점을 압축 가새가 지지할 경우 진동폭과 처짐량이 작았지만, 인장 부재가 지지하거나 절점 주변에 부재가 없을 경우에는 진동이나 처짐량이 더 큰 것으로 나타났다. 모멘트골조나 Knee-brace의 응답은 순수하게 가새만 설치된 경우보다 진동의 폭이나 처짐이 더 크게 나타났다.

비선형 정적해석 및 동적해석에서 구한 각 구조물의 최대 하중계수와 수직변위는 표 4와 같다. 예제 구조물들 중 Cross-type1 가새골조의 하중계수 가장 크고 동적해석에 의한 처짐도 가장 작았다. 이것은 앞서 그림 9에서 살펴본 것

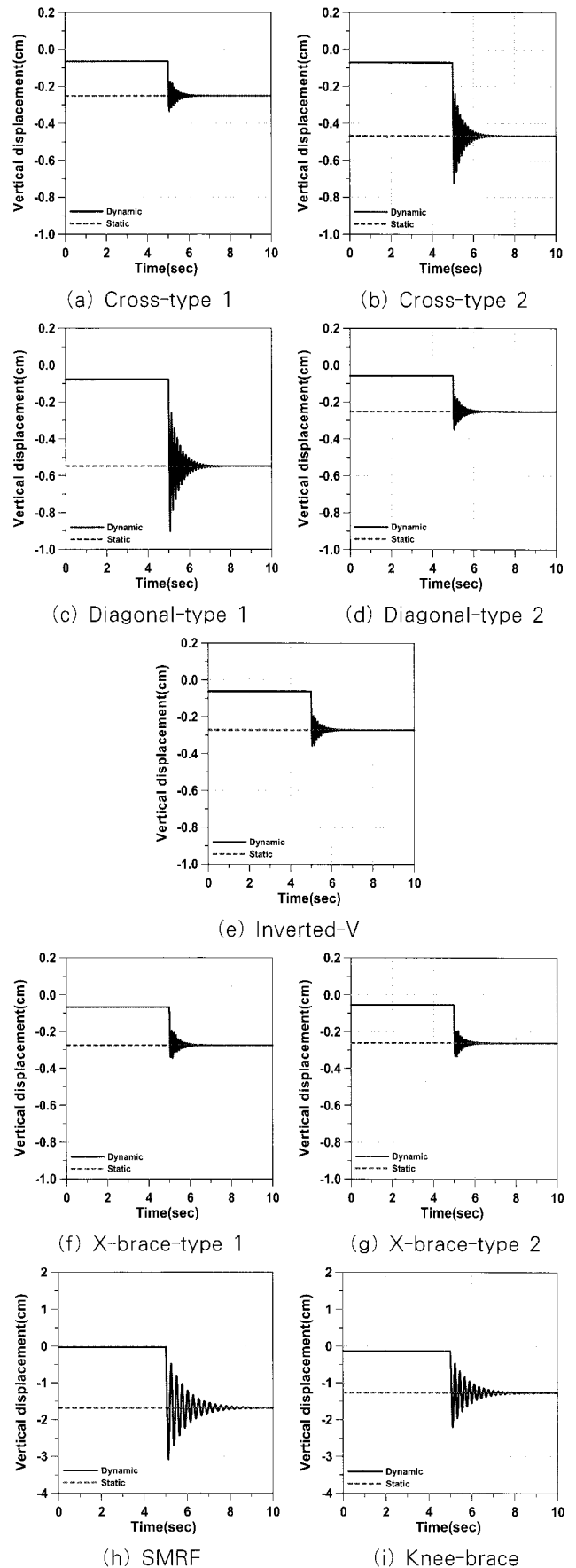


그림 20 가새 골조의 기둥 제거시 시간 이력해석

표 4 가새 시스템별 해석결과

구조시스템	비선형 정적해석 결과 최대하중계수	비선형 동적해석 결과 수직변위 (cm)
Cross-type1	2.48	-0.25
Cross-type2	2.05	-0.47
Diagonal-type1	2.28	-0.55
Diagonal-type2	2.42	-0.25
Invert-V	2.00	-0.27
X-brace-type1	1.92	-0.27
X-brace-type2	2.26	-0.26
SMRF	2.03	-1.69
Knee-brace	3.05	-1.27

과 같이 가새가 좌굴한 이후 기둥의 좌굴이 발생하기 때문에 저항성능이 우수하다고 판단된다.

앞서 2장에서 언급한 것과 같이 비선형 정적해석에서는 외력에 의한 기둥의 손실 때문에 발생하는 순간적인 충격효과를 고려하기 위하여 기둥이 제거된 공간에 중력하중을 증가시켜 해석을 수행한다. 그러나 모멘트저항골조와 달리 가새골조와 같이 하중의 전달 메커니즘이 달라질 경우 하중의 증폭정도와 적용영역에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다. 특히 중력하중의 증폭계수에 대한 Powell의 연구결과(2005)에 의하면 정적해석에서 사용하는 증폭계수 2는 매우 보수적인 결과를 나타낸다. 따라서 구조물의 연쇄붕괴 거동을 보다 정확하게 평가하기 위하여 동적해석을 수행해야한다고 주장하였다. 정적해석은 동적해석에 비하여 정확도가 다소 줄어들지만 4.1절에 나타난 것과 같이 비선형 정적해석을 통하여 구조물의 연쇄붕괴에 대한 최대저항성능을 평가할 수 있을 뿐만 아니라 하중단계별 거동을 동적해석에 비하여 쉽게 평가할 수 있는 방법이다. 특히 4.1절의 정적해석에 의한 pushdown 곡선에서 각 시스템의 하중계수가 1인 지점(동적증폭효과를 고려한 하중조합에 의한 하중)에서 구조물의 내력은 급격하게 저하되지 않고 기둥이 제거된 위치의 처짐량도 작음을 알 수 있다. 이러한 정적해석결과는 동적해석결과인 그림 20을 통하여도 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 비선형 정적해석 및 동적해석을 통해 특수 중심가새골조의 연쇄붕괴 저항성능을 평가하였다. 예제 구조물들은 층별로 2개 이상의 가새가 설치되어 있고, 기둥 제거 위치를 기준으로 양쪽에 대칭적으로 가새가 배치되어 있다.

해석 결과에 따르면 예제 구조물들은 GSA 기준에서 규정하고 있는 하중조건 2배정도의 저항내력을 보유하고 있는

것으로 나타났다. 그러나 가새골조의 횡하중에 대한 거동과 유사하게 기둥의 손실에 의한 수직방향 거동 또한 최대 하중에 도달한 이후 급격하게 저항력이 떨어지는 취성적인 거동을 보였다. 파괴 모드는 압축력을 받는 가새가 좌굴한 후 인장 가새가 하중을 부담하기 전에 취약한 기둥이 좌굴에 의해 파괴되는 것으로 나타났다. 이는 연쇄붕괴 해석시 중력하중만을 고려하므로 가새는 각 층의 중력하중만을 기둥으로 전달하는 역할을 할뿐 실질적으로는 기둥이 연속적으로 배치되어 더 많은 하중을 부담하는 것으로 판단되었다. 다만 역V형(Inverted-V) 가새골조는 압축가새의 좌굴 이후 인장가새가 충분한 저항력을 발휘할 때까지 가새의 불균형력을 보가 저항하여 파괴되지 않은 기둥으로 분배하면서 최대 하중계수 도달 이후에도 다른 구조물보다 큰 저항내력을 보유하고 있다.

본 연구에서는 연쇄붕괴에 대하여 가새만의 저항성능을 살펴보기 위하여 가새가 두 공간에 걸쳐 연속적으로 설치된 경우에 대하여 살펴보았다. 따라서 가새골조의 보다 객관적인 연쇄붕괴 저항성능 평가를 위하여 좀더 다양한 형태의 구조물과 붕괴 시나리오에 대하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2006-000-10234-0).

참 고 문 헌

김진구, 김태완 (2007) 비선형동적해석방법을 이용한 철골모멘트골조의 연쇄붕괴저항성능 평가, 대한건축학회 논문집, 23(5), pp.81~90.

AISC (2000) Load and resistance factor design specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago.

AISC (2002) Seismic Provisions for Structural Steel Buildings-Including Supplement No.1, ANSI/AISC 341-05, American Institute of Steel Construction, Chicago.

ASCE7-05 (2005) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, New York.

Corley, W.G., Mlakar Sr., P.F., Sozen, M.A., Thornton, C.H. (1998) The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation, *Journal of Performance of Constructed*

- Facilities*, 12(3), pp.100~112.
- FEMA** (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- GSA** (2003) Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, The U.S. General Services Administration.
- John E. Crawford.** (2002) Retrofit Methods to Mitigate Progressive Collapse, Report on the July 2002 National Workshop and Recommendations for Future Effort, The Multihazard Mitigation Council of the National Institute of Building Sciences.
- MIDAS Genw.** (2006) General Structure Design System for Windows.
- Powell, G.** (2005) Progressive Collapse: Case study Using Nonlinear Analysis, Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium, New York.
- SAP2000** (2004) Structural Analysis Program, Computers and Structures, Berkeley.
- Suzuki, I., Wada, A., Ohi, K., Sakumoto, Y., Fusimi, M., Kamura, H.** (2003) Study on High-rise Steel Building Structure That Excels in Redundancy, Part II Evaluation of Redundancy Considering Heat Induced by Fire and Loss of Vertical Load Resistant Members., Proc. CIB-CTBUH International Conf. on Tall Buildings, pp.251~259.
- Unified Facilities Criteria(UFC)-DoD** (2005) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Department of Defense.