



2011年 02月

碩士學位論文

연쇄붕괴방지를 위한 H형강의 좌굴후 에너지흡수 능력평가에 관한 연구

朝鮮大學校大學院

建築工學科

朴 炬 模

연쇄붕괴방지를 위한 H형강의 좌굴후 에너지흡수 능력평가에 관한 연구

Evaluation on the Post-buckling Energy Absorption of H-Shaped Steel Column for Prevention Progressive Collapse

2011年 2月 25日

朝鮮大學校大學院

建築工學科

朴 炬 模

연쇄붕괴방지를 위한 H형강의 좌굴후 에너지흡수 능력평가에 관한 연구

指導教授 崔 宰 赫

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2010年 10月

朝鮮大學校大學院

建築工學科

朴 炬 模

朴烜模의 碩士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校	教授	김정섭	印
委員	朝鮮大學校	教授	김의식	印

委員朝鮮大學校敎授 최재혁 印

2010年 11月

朝鮮大學校大學院

ABSTRACT

제1장서 론

1.1 연구의 배경 및 목적	
1.2 기존의 연구	>

제2장 부재단위에서의 H형강 기둥의 좌굴후 잔존내력

2.1 개요 ~~~~ 3
2.1.1 낙하물의 충격에 대한 단일층의 붕괴조건 ¹⁾
2.2 H형강의 비선형유한요소해석
2.2.1 개요 ~~~~~ 5
2.2.2 해석목적
2.2.3 H형강의 좌굴실험6
2.2.4 H형강의 좌굴해석1 (양단힌지인 경우)8
2.2.4.1 해석모델
2.2.4.2 재료모델
2.2.4.3 하중 및 경계 조건
2.2.4.4 실험과 해석결과와의 비교
2.3 일본건축학회기준에 의한 허용압축내력식과 좌굴후 안정내력식 16
2.3.1 힌지모델에 의한 해석
2.3.2 Paris해석을 통한 비교검토
2.3.3 해석 결과의 비교
2.4 H형강의 좌굴해석2 (양단고정인 경우)
2.4.1 해석모델
2.4.2 재료모델
2.4.3 하중 및 경계 조건

- | -

2.4.4 해석결과	 3
2.5 고찰	 5

제 3장 평면 프레임의 좌굴후 잔존내력 평가를 위한 비선형유한요소해석(1

층 4경간)

3.1 개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	· 26
3.2 해석모델	· 26
3.3 하중재하방법	· 27
3.4 해석결과	· 28
3.4.1 좌굴변형형상	· 28
3.4.2 강체 보의 회전이 구속인 경우	· 29
3.4.3 강체 보의 회전이 자유인 경우	· 38
3.5 고찰	· 46

제4장 극한해석에 의한 연직 하중 지지 능력평가

4.1	감도해석	47
4.2	극한해석	17
4.3	부재감도	50
4.4	극한해석모델	51
4.5	극한해석결과	53
4.6	극한해석결과와 비선형유한요소해석 결과의 비교	56

57
5

부록

1. 비선형유한요소해석 장비	및 프로그램 사진	60
2. 강체 보의 회전이 구속인	1층 4경간 프레임의 좌굴변형과정	61
3. 강체 보의 회전이 자유인	1층 4경간 프레임의 좌굴변형과정	69

- || -

표 차 례

표	2.1	시험체 개요
표	2.2	재료의 특성
표	4.1	극한해석 결과

- ||| -

|--|

그림 2.1 낙하물의 충격에 의한 단일층의 붕괴되지 않을 한계	4
그림 2.2 하중재하실험	···· 7
그림 2.3 시험체 개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	···· 7
그림 2.4 해석체 개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	8
그림 2.5 해석모델의 구속 및 회전조건	·· 10
그림 2.6 하중-변위 관계 비교 그래프(강축)	·· 11
그림 2.7 하중-변위 관계 비교 그래프(약축)	·· 12
그림 2.8 양단힌지 강축 좌굴변형 과정(좌측면)	·· 13
그림 2.9 양단힌지 강축 좌굴변형 과정(우측면)	·· 13
그림 2.10 양단힌지 약축 좌굴변형 과정(좌측면)	·· 14
그림 2.11 양단힌지 약축 좌굴변형 과정(우측면)	·· 14
그림 2.12 실험결과와 해석결과의 비교	. 15
그림 2.13 힌지모델	·· 16
그림 2.14 강축 결과에 대한 비교 그래프	. 19
그림 2.15 약축 결과에 대한 비교 그래프	·· 19
그림 2.16 양단고정 해석모델의 구속 및 회전조건	·· 22
그림 2.17 양단힌지 기둥압축모델	·· 22
그림 2.18 양단고정 기둥압축모델	·· 22
그림 2.19 양단고정 좌굴변형 과정(좌측면)	·· 23
그림 2.20 양단고정 좌굴변형 과정(우측면)	·· 23
그림 2.21 양단고정해석모델과 양단힌지해석모델 결과 비교	·· 24
그림 2.22 양단고정해석모델 좌굴형상	·· 25
그리 2.1 1초 4경기 편면 프레이 헤서티에	

	0.1	18 48년 8년 드네늄 예곡도론	20
그림	3.2	각 기둥제거별 타입 정의	27
그림	3.3	기둥의 좌굴형상	28
그림	3.4	기둥의 중앙부 및 단부의 좌굴형상	28
그림	3.5	보 회전구속 1층 4경간 좌굴변형 과정 (TYPE 1)	30

– IV –

3.6 1	l층 4경간 하중-변위 관계 ·······31
3.7 1	「ype1 하중-변위관계
3.8 1	「ype2 하중-변위관계
3.9 1	「ype3 하중-변위관계
3.10	Type4 하중-변위관계
3.11	Type5 하중-변위관계
3.12	Type6 하중-변위관계
3.13	Type7 하중-변위관계
3.14	Type8 하중-변위관계
3.15	부재손실위치별 에너지흡수능력(좌굴후 30%)
3.16	부재손실위치별 좌굴후내력 30% 지점의 연직변위
3.17	기둥부재손실에 따른 에너지흡수능력감소추이
3.18	보 회전 자유 1층 4경간 좌굴변형 과정(TYPE 1)39
3.19	1층 4경간 하중-변위 관계 40
3.20	Type1 하중변위관계40
3.21	Type2 하중변위관계
3.22	Type3 하중변위관계
3.23	Type4 하중변위관계
3.24	Type5 하중변위관계42
3.25	Type6 하중변위관계
3.26	Type7 하중변위관계43
3.27	Type8 하중변위관계
3.29	부재손실위치별 좌굴후내력 30% 지점의 연직변위 45
	3.6 1 3.7 1 3.8 1 3.9 1 3.10 3.11 3.12 3.13 3.14 3.15 3.16 3.17 3.18 3.17 3.18 3.19 3.20 3.21 3.22 3.23 3.24 3.25 3.24 3.25 3.26 3.27 3.29

그림	4.1	부재의 강소성 거동	47
그림	4.2	극한해석	50
그림	4.3	극한해석모델	51
그림	4.4	지점고정 보-기둥 압축모델	52
그림	4.5	TYPEI (12차 부정정 구조)	53
그림	4.6	TYPEII (9차 부정정 구조)	53

- V -

그림	4.7 TYPEIII (9차 부정정 구조) ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	53
그림	4.8 TYPEIV (11차 부정정 구조) ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	53
그림	4.9 TYPEV (6차 부정정 구조) ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	54
그림	4.10 TYPEVI (8차 부정정 구조) ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	54
그림	4.11 TYPEⅦ (8차 부정정 구조)	54
그림	4.12 TYPEⅧ (6차 부정정 구조)	54
그림	4.13 극한해석과 비선형유한요소해석 결과 비교	56

– VI –

Abstract

Evaluation on the Post-buckling Energy Absorption of H-Shaped Steel Column for Prevention Progressive Collapse

Park, Hwon Mo Advisor : Prof. Choi, Jae-Hyouk, Dr. of Eng. Department of Architectural Engineering, Graduate School of Chosun University

The buckling load in the elastic range of steel column member has been the subject of several studies. Majority of such research studies have been conducted within the range of initial plastic buckling load and small strain. Moreover, structural design mainly covers the initial bifurcation buckling and small strain. The load-deformation curve of an inelastic column was primarily handled in the aspect of an elasto-plastic hardening effect rather than restoring force decrease.

Also, if residual strength in vertical direction exceeds vertical load which added weight of falling objects to usual supportive vertical load as the result of absorbing released location energy, it does not result in progressive collapse. On the other hand, in case when weight of falling objects is included in usual supportive vertical load. In here, it was presumed that uniform impact is applied to all columns.

– VII –

In the study, using the plastic deformation energy of members to prevent the progressive collapse of structures, basic research was carried out to examine if progressive collapse can be prevented by absorbing the energy of the collapse loading of structures. In order to examine the possibility of residual post-buckling restoration force supporting vertical load after the progressive collapse comes to a complete stop, the post-buckling strength of the H-shaped column member and the plastic deformation capacity were reviewed comparison, it was made between the value obtained from the loading test and the results following a non-linear FEM analysis.

Furthermore, a trend of post-buckling energy absorption ability was analyzed according to loss positions and number of column members by reviewing the trend of deterioration of energy for column member loss regarding the 1-story 4-spans rigid beam-weak column frame. Therefore, non-linear FEM analysis of the 1-story 4-spans plane steel frame was carried out and energy absorption capacity of column members for accidental loss was evaluated. And, limit analysis of the 1-story 4-spans plane frame was carried out and level of deterioration of vertical load was reviewed with the result of FEM analysis.

Following the comparison of the H-shaped column member, maximum load value and post-buckling behavior were accurately forecast. Also, energy absorption ability of the 1-story 4-spans plane frame was reduced drastically together with losses of column members and simultaneous deterioration of load carrying capacity and displacement ability. It is expected that the results obtained from the study will be available for future research into prevention of progressive structural collapse using the plastic deformation energy of members.

– VIII –

제1장서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 예상 이외의 하중에 의한 구조물의 일부 손실로 인하여 전체 구조물이 파괴에 이르는 연쇄붕괴에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내의 경우, 실제구조 물의 붕괴사례를 파괴메커니즘을 분석·검토하여, 설계 시안단계에서 활용할 수 있는 설계법 및 적용사례에 대한 연구는 매우 미흡하여, 향후 대응방안을 위한 대책수립을 위한 관련 긴급한 자료축척이 요구되는 실정이다. 특히 지역특성을 고려한 우발적 하 중에 의한 구조물파괴의 실거동을 직접적으로 평가하여, 구조물의 안전성 향상을 위한 신뢰할 수 있는 방재성능 평가모델개발이 시급하다고 할 수 있다.

구조물을 구성하는 부재가, 구조물전체의 하중지지능력에 미치는 영향도 또는 부재 감도는 구조물의 리던던시와 밀접한 관계에 있다. 이 부재의 감도를 정량적으로 정의 하여 부재손실전후에 대한 골조구조물의 하중지지능력의 변화 추이를 평가 한다.

평면골조의 부재감도해석을 수행하였다. 이때, 단일 부재가 손실되는 경우와 한 층 의 전체의 부재가 손실되는 경우등 다양한 붕괴시나리오에 대해서 구조물 전체의 하중 지지능력에 대해서 검토 한다.

한편, 구조물의 진행성 붕괴를 방지할 목적으로 부재의 소성변형 에너지를 이용하여 구조물의 붕괴하중의 에너지를 흡수하여 붕괴의 진행을 방지할 수 있는 가능성을 검토 하기 위한 기초연구를 수행한다. 또한 비선형유한요소해석프로그램을 이용하여 대변형 후 종국하중지지능력 상실의 추이 검증한다.

본 연구에서는 우발적인 하중이 가해졌을 때 개별적인 부재 레벨에서 평면 구조물의 하중지지능력을 평가하여, 구조물의 붕괴 메커니즘을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 실 증적으로 검토한다.

- 1 -

1.2 기존의 연구

세계무역센터(WTC)의 붕괴사고 이후 연쇄붕괴에 의한 관심이 증대 되었고 연쇄붕괴 의 방지를 위한 가이드라인이 제시되고 이를 보완하기 위한 많은 연구들이 이루어 졌 다. 한편, 발파해체 붕괴 등 붕괴 거동 시뮬레이션 연구도 많이 진행 되고 있다.

최재혁(2010)등은 연직하중을 받는 벨트트러스 보강 유무에 따른 해석모델을 대상 으로 극한해석을 이용한 부재감도해석을 수행하여 부재의 중요도를 평가하고 소성힌지 발생 지점을 분석하였다.

이경구(2010)는 Conwep 폭발하중을 이용한 유한요소해석을 수행하여 폭발하중을 받는 압축재의 연직하중에 대한 잔여저항성능을 평가하였다. 휨소성모멘트가 동일하고 단면형상이 다른 압축재를 대상으로, 폭발물 질량과 이격거리를 동시에 고려한 축척거 리에 따른 폭발 손상도와 잔여 압축강도를 분석하였다.

김진구(2008)등은 모멘트 골조에서의 아홉 개의 서로 다른 가새 형태를 고려하여 비선형 정적해석 및 동적해석을 이용하여 가새골조의 연쇄붕괴 저항능력을 평가하였 다. 특히 압축가새가 좌굴한 후 인장가새가 인장력을 발휘하기 전에 취약한 층의 기둥 이 좌굴하는 것으로 나타났다.

이철호(2007)등은 폭발하중 등의 이상하중에 의한 기둥손실을 가정한 초고층건물의 연쇄붕괴방지설계와 관련된 연구를 통하여 용접철골모멘트골조의 2경간 보의 거동을 살펴보고, 새로운 개념의 효율적 철골모멘트골조의 비선형 정적 및 동적 연쇄붕괴 근 사해석법을 제안하였다.

Ohi(2002)는 해방된 위치에너지는 하중변형관계에 따라 에너지흡수가 가능하여, 기 둥에 좌굴이 발생하여 좌굴후의 내력저하가 발생하지만 에너지를 흡수한 결과 잔존하 는 연직방향의 연직하중을 상회하면 진행행 붕괴로 이어지지 않을 조건을 제안하였다.

Zdenêk P. Bazânt(2002)등은 WTC의 붕괴 시나리오를 폭발과 화재에 의한 강기둥 의 항복강도 저하와 점탄성변형 이후에 좌굴이 발생되어 하중지지능력이 상실되면서 상부 층의 무게가 실린 충격이 연직동적하중으로 실려 빠르게 붕괴되는 등 5단계로 제시하였다. 특히 소성힌지가 발생한 기둥의 소성 회전각을 통한 연직하중식을 제안하 였다.

- 2 -

제2장 부재단위에서의 H형강 기둥의 좌굴후 잔존내력

2.1 개요

2.1.1 낙하물의 충격에 대한 단일층의 붕괴조건¹⁾

OHI(2002)는 기둥 또는 기둥군(群)을 연직저항요소로 하는 구조물에 낙하물에 의한 충격을 가해 질 때, 기둥군(群)이 어느 정도 손상을 입었더라도 낙하물의 운동에너지 (또는 해방된 위치에너지)를 흡수해 진행성붕괴로 이어지지 않을 조건으로 구조물의 연직방향에 대한 하중변형관계를 명확히 알 수 있을 때 다음과 같은 방법을 제안하였 다.

그림2.1(a)에 나타내는 바와 같이 해방된 위치에너지는 하중변형관계에 따라 다음과 같이 에너지흡수가 가능하다. 기둥에 좌굴이 발생하여 좌굴후의 내력저하가 발생하지 만 에너지를 흡수한 결과 잔존하는 연직방향의 내력이 상시 지지하는 연직하중에 낙하 물의 중량을 합한 연직하중을 상회하면 진행행 붕괴로 이어지지 않는다. 2001년 9월 에 발생한 뉴욕의 세계무역센터(WTC)의 경우와 같이 낙하물의 중량이 상시 지지하고 있는 연직하중에 포함되어 있는 경우는 그림2.1(b)의 경우와 같이 된다. 여기서, 기둥 이 복수인 경우는 각 기둥의 충격력의 부담이 문제가 되지만 모든 기둥에 균일한 충격 력이 가해지는 것으로 가정하여 단일 기둥의 거동으로 대표되는 것으로 하였다.

Bazânt의 연구결과에서는 구조물 상부의 위치에너지가 1층으로부터 2층분의 높이방 향의 하중이 해방되는 경우, 그 크기가 연직하의 구조체에 흡수 가능한 소성에너지를 비교하면 WTC의 경우 8.4배를 상회하여 진행성 붕괴를 멈출 수 없었다고 결론 내리 고 있다. 본 연구에서는 이에 대한 역발상으로서 구조체가 어떤 조건을 만족하면 진행 성붕괴를 방지할 수 있는지에 대해서 검토하고자 한다.

- 3 -





그림 2.1 낙하물의 충격에 의한 단일층의 붕괴되지 않을 한계

- 4 -

2.2 H형강의 비선형유한요소해석

2.2.1 개요

철골 기둥부재의 탄성영역에서의 좌굴하중에 관한 연구는 1744년부터 시작되어 현 재까지 많은 실험과 연구가 지속되고 있었다. 이 연구들은 대부분 초기 소성좌굴하중 및 미소변형 범위에서의 이루어져 왔다. 또한, 구조물의 설계에서도 초기의 분기좌굴 및 미소변형만을 다루고 있어, 탄소성기둥의 하중변형 곡선은 내력저하 보다는 탄성-완전소성 경화효과 측면에서 주로 다루어 졌다.

예상이외의 하중을 받았을 경우등 강기둥은 좌굴하중이 큰 소성변형 능력을 나타내 고 있어, 좌굴후의 대변형 영역에 있어서의 기둥부재의 변형 능력 및 내력에 관한 평 가 문제가 거론되고 있다.

일본건축학회의 한계상태설계지침에서는, 좌굴후 안정내력식이 제안되어 있지만, 이 는 가새의 보유수평내력 산정을 위한 것으로서, 축 변형율이 1% 정도의 변형 영역의 잔존 내력이다. 이는 몇 십%에 이르는 대변형 좌굴후 내력으로서는 적용할 수 없다. 좌굴후 소성영역에 있어서의 연구는 Paris, Koto등의 연구가 있지만 축변형율 20~ 30% 정도의 대변형 영역까지의 변형능력 및 내력에 관한 연구는 매우 제한적인 형편 이다. 따라서 소성변형 전구간에 대한 연구가 필요하다. 또, 힌지모델에 의한 해석법으 로 Bažant의 간편해석이 있지만 더욱 엄밀한 해석 및 실험을 통한 검증이 필요하다.

본 장에서는, 구조물의 진행성 붕괴를 방지할 목적으로 부재의 소성변형 에너지를 이용하여 구조물의 붕괴하중의 에너지를 흡수하여 붕괴의 진행을 방지할 수 있는 가능 성을 검토하기 위한 기초연구를 수행하였다. 붕괴 진행이 멈춘 후 좌굴후 잔존내력으 로 연직하중을 지지하는 가능성을 검토하기 위하여, 먼저 H형강 기둥 부재의 좌굴후 내력, 소성변형 능력을 실험을 통하여 검토하였다. 또한 재하 실험에서 얻어진 값을 비선형유한요소해석을 실시하여 실험값과 비교하였다.

본 장에서는 세장비가 한계세장비 이하의 비탄성좌굴영역만을 검토 대상으로 하였 다.

- 5 -

2.2.2 해석목적

본 연구에서는, H형강기둥의 비선형 동적 좌굴해석을 실시하여, Lee(2004)가 실시 한 실험의 결과와 해석 이론식, 본 비선형동적해석 결과를 비교·검토하는 것으로 검증 한다.

2.2.3 H형강의 좌굴실험

그림 2.1과 같이, H형강 기둥부재의 압축실험을 실시하여, 대변형 영역에서 소성변 형능력 및 좌굴후 내력을 검토하였다. 실험체는 H-100x100x6x8을 이용하여 제작하였 다. 그림 2.2와 같이, 본 기둥 부재 압축실험의 양단 지지조건은 핀지지로 하였다. 연 직방향 변위 측정은 재하기구 상하 사이의 변형을 변위계로 측정하였다. 또한, 수평 방향은 실험체의 중앙에서 변위계를 설치하여 측정하였다. 하중은 재하기구 내장형 로 드셀을 사용하였다.

구분	치수값	
단면적(mm ²)	2.19x10 ³	
	<i>I_x</i>	3.83x10 ⁶
[I_y	1.34x10 ⁶
	r _x	4.18x10 ¹
년 번2자 번영(IIIIII)	r_y	2.47×10 ¹
다며게스(mm ³)	S_{x}	7.65x10 ⁴
은 한계구(IIIII)	S_y	2.67x10 ⁴
~ 석다며게스(~~~ ³)	Zx	8.76x10 ⁴
조정안면계후(mm)	Zy	4.12x10 ⁴
축응력 $\sigma_{\!\scriptscriptstyle \mathcal{Y}}\!(\mathrm{kN/mm^2}$	350	
축변형률 <i>ε_ν</i> (μ)	1667	
비자비	λ_x	18.77
	λ_y	31.51

표 2.1 시험체 개요

*탄성계수(E=2.1x10⁵ N/mm²)

- 6 -



그림 2.2 하중재하실험



그림 2.3 시험체 개요

- 7 -

2.2.4 H형강의 좌굴해석1 (양단힌지인 경우)

본 연구에서는 범용 비선형유한요소해석프로그램인 LS-Dyna를 이용하여 응력과 변 형관계를 계산하였다. 본 프로그램은 해석 중에 메쉬가 지정되는 적용메쉬기능을 통하 여 해석시간 및 정밀도가 우수한 특징이 있다.

2.2.4.1 해석모델

그림 2.4에서 나타낸 바와 같이 해석 모델은 실험에서 사용된 실험체와 동일한 길이 의 H-100x100x6x8의 단면형상으로 하였다. 또한 핀 지지의 부분은 양 엔드 플레이트 간의 거리의 무게 중심점이 있는 강체로서 가정하였다. 본 해석에서는 셀요소을 이용 하여 모델링을 하였다.



그림 2.4 해석체 개요

- 8 -

2.2.4.2 재료모델

해석모델의 재료는 실험체와 동일한 SS400을 사용하였으며, 해석프로그램에 정의된 Plastic Kinematic모델을 이용하여 재료의 특성을 모델링 하였으며, 강체는 해석프로그 램에 정의된 Rigid Material Steel을 이용하였다. 표 2.2에 각 재료의 특성을 나타내었 다.

	해석모델	강체
탄성계수 (GPa)	205	205
포아송비	0.29	0.3
밀도 (kg/mm ³)	7.845x10 ⁻⁶	7.7×10 ⁻⁶
항복응력 (GPa)	0.31	
Tangent modulus (GPa)	1.0	
Failure strain	0.23	

표 2.2 재료의 특성

2.2.4.3 하중 및 경계 조건

그림 2.5에서 나타낸 바와 같이 실험체의 하부강체는 모든 변위를 완전구속하고 강 축 및 약축에 따라 x및 z방향의 회전은 자유로 하였다. 상부강체는 y방향의 변위를 자 유로 하고 하부강체와 같이 강축 및 약축에 따라 x및 z방향의 회전도 자유로 하였다.



그림 2.5 해석모델의 구속 및 회전조건

하중은 중심 축하중을 상부강체에 강제변위를 부여하는 것으로 재하하였다. 실험과 동일한 조건의 재하속도를 재현하기 위해 10mm/sec로 선형적으로 하중증분 하였다.

해석모델과 강체 간의 접합은 해석모델의 양단에 extra node를 생성한 후 강체 파 트와 강접합 하였다. 또한 하부강체와 해석모델간에 Tied Shell Edge - to - Surface contact으로 정의하여 반력을 구하였다.

-10-

2.2.4.4 실험과 해석결과와의 비교

H형강기둥의 강축에 대한 비선형유한요소해석 (non-linear FEM analysis)결과를 그 림 2.6와 2.7에 나타내었다. 그림 2.6은 강축에 대한 하중-변위의 탄소성 거동을 나타 내었다. 최대하중에 도달할 때까지 해석모델 중앙부의 변형은 거의 일어나지 않았다. 이후 국부좌굴의 발생과 더불어 급격한 내력저하 및 변형이 발생하였다.



그림 2.6 하중-변위 관계 비교 그래프(강축)

- 11 -

그림 2.7은 약축에 대한 하중-변위의 탄소성 거동을 나타내었다. 최대하중에 도달 후 국부좌굴의 발생과 더불어 급격한 내력저하 및 변형이 발생하였다.



그림 2.7 하중-변위 관계 비교 그래프(약축)

약축에 관한 하중-변형율 특성은 강축에 비교해서 내력저하가 더욱 급격이 이루어 졌다. 그림 2.7에서 나타낸 바와 같이 변형율 4%이후 최대하중의 20%이하의 잔존내 력값을 나타내고 있다.

그림 2.12는 강축 재하실험시의 실험체의 대변형 좌굴후의 변형 성상과 비선형FEM 해석의 해석결과이다. 중앙부에서 플랜지의 국부좌굴이 발생하는 실험결과와 동일한 변형성상을 얻을 수 있었다.

- 12 -



(a) substep=0 (b) substep=25 (c) substep=50 (d) substep=75 (e) substep=100

그림 2.8 양단힌지 강축 좌굴변형 과정(좌측면)



그림 2.9 양단힌지 강축 좌굴변형 과정(우측면)

- 13 -



그림 2.10 양단힌지 약축 좌굴변형 과정(좌측면)



그림 2.11 양단힌지 약축 좌굴변형 과정(우측면)

- 14 -



그림 2.12 실험결과와 해석결과의 비교

- 15 -

2.3 일본건축학회기준에 의한 허용압축내력식과 좌굴후 안정내력식2.3.1 힌지모델에 의한 해석



그림 2.13 힌지모델

Bažant에 의하면, 그림 2.13에서 나타낸 바와 같이 양단 핀의 기둥이 하중을 받아 항복내력으로 소성이 발생하여 축응력이 생겼을 때 중앙부에 소성힌지가 발생한다. 기 둥의 절반을 자유물체도로 나타내었을 때 모멘트 균형으로부터, 축력은 *P=2M_{pc}/Lsinθ* 으로, 변형량은 Δ=L(1-cosθ)으로 한다. 소성회전각을 제거하는 것으로부터 식(1)을 얻을 수 있다.

$$P = \frac{2M_{pc}}{L\sqrt{1 - [1 - (\Delta/L)]^2}}$$
(1)

양단힌지 압축좌굴실험에서는 시험체의 회전각40도에 가까운 소성변형능력을 확인 했지만, 시험체는 이보다 더 큰 변형 능력을 가지고 있다고 판단된다. 실제로는 부재 의 소성변형능력은 기둥-보 접합부와 소성힌지 부분에서의 소성변형능력에 의해 결정 된다.

- 16 -

축력과 변형량의 관계(P-Δ)에서 식(2)를 얻을 수 있다.

$$\Delta = L - \sqrt{L^2 - (2M_{pc}/p)^2}$$
⁽²⁾

H형강의 경우, 축력과 모멘트의 상관관계(P-M)를 고려하여 일본건축학회의 강구조 한계상태설계 지침등에서 채용되고 있는 다음과 같은 내력 상관식을 도입한다.

H형강 단면 강축:
$$\frac{N}{N_Y} + 0.85 \frac{M}{M_P} \le 1$$
 $M \le M_P$ (3)

H형강 단면 약축:
$$(\frac{N}{N_{\gamma}})^2 + 0.84 \frac{M}{M_p} \le 1$$
 $M \le M_p$ (4)

식(2)으로부터, H형강 강축의 경우 식(3)을 대입하여 식(5)와 식(6)을 얻을 수 있고, 약축의 경우 식(4)를 대입하여 식(7)와 식(8)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta}{L} = 1 - \sqrt{1 - (\frac{2Z_p}{L \cdot A})^2 \cdot (\frac{1}{P/P_y})^2} \qquad P/P_y < 0.15$$
(5)

$$\frac{\Delta}{L} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2Z_p}{0.85L \cdot A}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{P/P_y}\right)^2} \qquad P/P_y \ge 0.15 \tag{6}$$

$$\frac{\Delta}{L} = 1 - \sqrt{1 - (\frac{2Z_p}{L \cdot A})^2 \cdot (\frac{1}{P / P_y})^2} \qquad P / P_y < 0.4$$
(7)

$$\frac{\Delta}{L} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2Z_p}{0.84L \cdot A}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{P/P_y} - P/P_y\right)^2} \qquad P/P_y \ge 0.4 \tag{8}$$

- 17 -

2.3.2 Paris해석을 통한 비교검토

식(2)의 힌지모델에 의한 좌굴후의 하중과 연직변형관계의 평가를 검토하기 위해 Paris의 식을 대입하여 비교 및 검토를 하였다.

Paris의 제안식으로부터 좌굴후 축력과 변형량의 관계(P-Δ)의 관계는 다음의 식 (9) 와 같다.

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{P}{A \cdot E} + \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot (\Delta_T)^2 \tag{9}$$

여기서, Δ_T=M_{pc}/P이다.

식(9)로 부터, H형강 강축의 경우 식(3)에 대입하여 식(10)와 식(11)을 얻을 수 있고, 약축의 경우 식(4)에 대입하여 식(12)와 식(13)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{P}{P_y} \cdot \varepsilon_y + \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot \left(\frac{Z_p}{A}\right)^2 \left(\frac{1}{P/P_y}\right)^2 \qquad P/P_y < 0.15 \tag{10}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{P}{P_y} \cdot \varepsilon_y + \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot \frac{1}{0.85^2} \cdot (\frac{Z_p}{A})^2 \cdot (\frac{1}{(p/p_y)} - 1)^2 \qquad P/P_y \ge 0.15$$
(11)

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{P}{P_y} \cdot \varepsilon_y + \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot \left(\frac{Z_p}{A}\right)^2 \left(\frac{1}{P/P_y}\right)^2 \qquad P/P_y < 0.4$$
(12)

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{P}{P_y} \cdot \varepsilon_y + \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot \frac{1}{0.84^2} \cdot \left(\frac{Z_p}{A}\right)^2 \cdot \left[\frac{1}{(p/p_y)} - (p/P_y)\right]^2 \qquad P/P_y \ge 0.4$$
(13)





- 19 -

힌지모델해석에 의한 식(7), (8), Paris해석에 의한 식(12), (13)과 약축 실험결과를 그림 2.15과 같이 비교 하였다.

그림 2.15에서 보는 바와 같이, 변형률 5%이상에서 실험과 해석결과는 거의 일치하 고 있다.

힌지모델해석에 의한 식(5), (6), Paris해석에 의한 식(10), (11)과 강축 실험결과를 그림 2.14과 같이 비교 하였다.

그림 2.14에서 보는 바와 같이, 강축에 변형이 생기는 경우, 실험과 해석의 결과가 약간의 오차가 생기고 있다. 그 원인은 그림 2.14에서 볼 수 있듯이, 최대내력이 발생 할 때, 부재의 전단변형 및 소성힌지 부분에서의 국부좌굴변형이 생겨 내력이 급격히 떨어지는 과정에서 단면계수 Z_P가 변동하고 있는 것이 예상된다. 여기서 Z_P를 수정해 평가하면 약축좌굴이 생기는 경우와 같이, 대체로 일치하고 있다.

해석결과, 소성힌지모델에 의한 간편한 해석법으로 좌굴후 대변형영역에 있어서의 축력과 변형량의 관계(P-Δ)를 기본적으로 평가할 수 있는 것을 알 수 있었다.

- 20 -

2.4 H형강의 좌굴해석2 (양단고정인 경우)

2.4.1 해석모델

그림 2.11에서 나타낸 바와 같이 해석 모델은 앞서 양단힌지조건에서 사용된 해석모 델과 동일한 H-100x100x6x8의 단면형상으로 하였다. 또한 고정지지의 부분은 양 엔 드 플레이트간의 거리의 무게 중심점이 있는 강체로서 가정하였다. 본 해석에서는 셀 요소을 이용하여 모델링을 하였다.

2.4.2 재료모델

양단고정일 경우, 해석모델의 재료는 양단힌지인 경우와 동일한 SS400을 사용하였으며, 해석프로그램에 정의된 Plastic Kinematic모델을 이용하여 재료의 특성을 모델링 하였다. 강체는 해석프로그램에 정의된 Rigid Material Steel을 이용하였다.

2.4.3 하중 및 경계 조건

그림 2.16에서 나타낸 바와 같이 양단고정의 경계조건을 위해 해석모델의 하부강체 는 모든 변위 및 회전을 완전구속 하였다. 상부강체는 y방향의 변위를 자유로 하고 하 부강체와 같이 모든 회전을 완전구속 하였다.

하중은 중심 축하중을 상부강체에 강제변위를 부여하는 것으로 재하하였다. 실험과 동일한 조건의 재하속도를 재현하기 위해 10mm/sec로 선형적으로 하중증분 하였다.

해석모델과 강체 간의 접합은 해석모델의 양단에 extra node를 생성한 후 강체 파 트와 강접합 하였다. 또한 하부강체와 해석모델간에 Tied Shell Edge - to - Surface contact으로 정의하여 반력을 구하였다.

- 21 -



그림 2.17와 그림 2.18을 통하여 경계조건에 따른 기둥압축모델의 구속조건과 반력 을 비교 하였다. 그림 2.17와 같이 양단힌지인 경우, 양단의 회전의 자유에 따라 모 멘트와 수평방향의 반력에 대한 고려가 이루어 질수 없이 y축 연직방향에 대한 하중의 반력만을 고려 될 것으로 생각한다. 또한 그림 2.18의 양단고정인 경우, y축 방향에 한해 변위를 허용하였을 때, 고정된 지점에 대한 구속된 회전과 수평방향에 대한 모멘 트와 수평방향의 반력에 대하여 고려되어야 할 것으로 생각한다.

- 22 -





그림 2.19 양단고정 좌굴변형 과정(좌측면)



- 23 -


그림 2.21에 나타난 양단고정 단주의 해석모델에 관한 연직하중-변위관계의 그래프 의 곡선 추이를 살펴보면, 최대하중에 도달 후 급격한 내력 저하를 보인 양단힌지모델 과는 달리, 최대하중에 도달 부근에서 완만한 내력 증가 및 내력 저하를 보였고, 변형 이 진행되어도 비교적 완만하게 내력이 감소되는 추이를 볼 수 있었다. 이는 그림 2.17와 그림 2.18의 경계조건에 따라 작용되는 모멘트에 관한 또는 방향별 반력의 차 이가 연직하중의 증가에 관여 할 가능성이 있을 것으로 예상된다. 또한 이번 양단고정 단주의 해석의 결과를 통해 다음 장의 평면프레임의 기둥-보간의 접합조건과 동일한 것으로 그에 따른 결과 추이를 분석하는 데에 참고해야 할 사항으로 생각한다.

그림 2.22와 같이 양단고정해석모델의 변형형상을 나타내었다. 양단힌지모델의 변형 형상을 나타낸 그림 2.12와 비교하면, 중앙부에 국부좌굴이 일어났고, 양단부에도 약 간의 국부좌굴이 일어났다. 또한 전체적으로 미세한 변형이 일어났음을 알 수 있다.

- 24 -



2.5 고찰

붕괴 진행이 멈춘 후 좌굴후 잔존내력으로 연직하중을 지지하는 가능성을 검토하기 위하여, 소성 힌지 모델에 의한 해석에 근거한 대변형 영역에서의 좌굴후 내력과 변형 의 관계를 파악할 수 있게 되었다. H형강의 좌굴실험 및 비선형유한요소해석 결과와 비교하여 약축에 발생되는 변형의 경우에서는 해석 결과와 실험 결과는 대체로 일치하 지만, 강축에 발생되는 변형의 경우에서는 약간의 오차가 있다. 그 원인은 부재의 좌 굴 변형 및 소성 힌지부에서의 국부좌굴등이 오차의 주된 요인으로 보여 이에 대한 해 결과제를 남겼지만 대체로 힌지 모델에 의한 해석식의 유효성을 나타냈다. 연직 부재 가 하중을 받았을 경우, 탄성 영역 및 초기비탄성 영역에서의 좌굴은 기존의 오일러식 에서 평가하였지만, 좌굴후의 대변형 영역에서는 힌지 모델에 의한 평가식에서 비교적 으로 간단하게 평가할 수 있는 것을 나타냈다. 향후, 부재의 소성변형 에너지를 이용 하여 구조물의 진행성붕괴방지 연구에 활용 가능할 것으로 판단된다.

- 25 -

제 3장 평면 프레임의 좌굴후 잔존내력 평가를 위한 비 선형유한요소해석(1층 4경간)

3.1 개요

본 장에서는 1층 4경간 프레임의 비선형유한요소해석을 실시하여 에너지흡수 능력 에 관하여 평가하기로 한다. 제 2장의 H형강 기둥의 좌굴해석은 실험결과와 비교하여 하중-변위간의 추이가 거의 일치함을 알았다. 앞서, 수행한 단주 좌굴해석 원리를 프 레임으로 확장하여 프레임의 에너지 흡수 능력에 관하여 검토하고자 한다. 각 기둥제 거 사례별로 해석을 수행하였다.

3.2 해석모델

그림 3.1에서 나타낸 바와 같이 해석 모델의 기둥 부분은 제 2장의 H형강 좌굴 해 석과 동일한 H-100x100x6x8의 단면형상으로 하였다. 또한 상하부의 보 부분은 강체 로서 가정하였다. 본 해석에서는 셀요소을 이용하여 모델링을 하였다. 상부강체를 연 직방향인 Y축 변위만 허용하고 그 외의 방향의 변위 및 모든 회전을 구속한 경우와 연직방향의 Y축변위와 Z축회전만을 허용하고 그 외의 방향의 변위 및 모든 회전을 구 속한 경우등 2가지의 상부강체 구속조건에 따른 모델링을 하였다. 또한 하부강체는 모 든 방향의 변위와 회전을 구속하여 고정 시켰다.



- 26 -



또한, 아래의 그림 3.2와 같이, 각 기둥제거 사례별로 비교하였다.

3.3 하중재하방법

하중은 붕괴시 급격한 하중 증가를 가정하여, 중심 축하중을 상부강체 보에 연직방 향으로 강제변위를 부여하는 것으로 100 mm/sec로 선형적으로 하중증분 재하 하였 다. 해석모델과 강체 간의 접합은 해석모델의 양단에 extra node를 생성한 후 강체 파 트와 강접합 하였다. 또한 상부강체와 해석모델간에 Tied Shell Edge - to - Surface contact으로 정의하여 반력을 구하였다.

- 27 -

3.4 해석결과

3.4.1 좌굴변형형상

그림 3.3과 그림 3.4에서 나타낸 바와 같이 양단이 고정임에도 약축방향으로 좌굴이 되었다. 또한 기둥의 중앙부의 급격한 국부좌굴 외에도 양단 부근에도 약간의 좌굴이 발생하였다. 이는 2장에서의 양단고정 단주 압축좌굴 해석과 비교하여 보면, 기둥이 길어짐에 따라 세장비의 영향으로 양단에 소성힌지가 발생하여 2장에서의 양단힌지 약축방향 좌굴해석과 비슷한 좌굴형상이 일어난 것으로 보인다.



그림 3.3 기둥의 좌굴형상



그림 3.4 기둥의 중앙부 및 단부의 좌굴형상

- 28 -

3.4.2 강체 보의 회전이 구속인 경우

그림 3.5는 타입1의 시간에 따른 상부 강체보의 연직변위와 그에 따른 기둥의 좌굴 형상을 나타내었다. 보는 바와 같이, 상부강체 보의 회전 구속으로 수평인 형태로 내 려 앉았음을 볼 수 있었다. 또한 각 타입별 하중-관계 곡선으로 비교하였고, 각 타입 별로 좌굴 후 내력 30%에 따른 에너지 흡수량과 변위를 나타내었다.

- 29 -



그림 3.5 보 회전구속 1층 4경간 좌굴변형 과정 (TYPE 1)

- 30 -



P/P₀ 1 Type 1 (기둥 무손실) 0.8 0.6 0.4 좌굴후 내력의 30% 저하 0.2 276.6 (N·mm/N) E, = 0 39.7 10 20 30 50 60 70 0 80 90 100 변위 (mm)

그림 3.6 1층 4경간 하중-변위 관계

그림 3.7 Type1 하중-변위관계

- 31 -



그림 3.8 Type2 하중-변위관계



그림 3.9 Type3 하중-변위관계

- 32 -



그림 3.10 Type4 하중-변위관계



그림 3.11 Type5 하중-변위관계

- 33 -



그림 3.12 Type6 하중-변위관계



그림 3.13 Type7 하중-변위관계

- 34 -



그림 3.14 Type8 하중-변위관계



그림 3.15 부재손실위치별 에너지흡수능력(좌굴후 30%)

^{- 35 -}



그림 3.16 부재손실위치별 좌굴후내력 30% 지점의 연직변위



그림 3.17에서 보는바와 같이 좌굴후 내력이 30%로 저하되었을때 기둥손실에 따른 연직방향 변위의 추이를 살펴보면 원래의 기둥부재 5개가 건전한 상태에 비하여 1개 의 기둥부재가 소실되었을 경우 약 90~80% 정도의 변형이 발생하였다. 또한 2개의 기둥부재가 손실되었을 경우, 연직방향으로 약 80~75%의 변형이 발생함을 알수 있 다.

기둥부재의 손실이 발생함에 따라 연직하중을 지지할 수 있는 하중전달능력의 저하 와 더불어 변형능력 또한 동시에 저하함으로써 구조물 전체의 에너지흡수능력이 급속 히 감소하였다.

- 37 -

3.4.3 강체 보의 회전이 자유인 경우

보의 회전이 고정인 경우와 마찬가지로 그림 3.18은 타입1의 시간에 따른 상부 강 체보의 연직변위와 그에 따른 기둥의 좌굴형상을 나타내었다. 하중을 재하할수록 강체 보를 한 파트로써 균등하게 하였음에도 어느 한쪽에 기울어지며 내려 앉는 형상을 볼 수 있었다. 이를 통해 기둥 배치가 서로 평형임에도 어느 한쪽의 기둥이 먼저 항복하 여 좌굴이 진행되며 계속하여 그 방향에 대해 의존하는 성향을 추측해 볼 수 있었다. 또한 각 타입별 하중-관계 곡선으로 비교하였고, 각 타입별로 좌굴 후 내력 30%에 따 른 에너지 흡수량과 변위를 나타내었다. 단 변위는, 상부강체가 무게 중심점을 가지는 질량체 이므로 그 중심점에 대한 변위로써 정의 하기로 한다.

- 38 -



그림 3.18 보 회전 자유 1층 4경간 좌굴변형 과정(TYPE 1)

- 39 -



변위 (mm) 그림 3.20 Type1 하중변위관계

- 40 -







그림 3.22 Type3 하중변위관계

- 41 -



그림 3.23 Type4 하중변위관계



그림 3.24 Type5 하중변위관계

- 42 -



그림 3.25 Type6 하중변위관계



그림 3.26 Type7 하중변위관계

- 43 -







- 44 -



그림 3.29 부재손실위치별 좌굴후내력 30% 지점의 연직변위

그림 3.28에서 보는바와 같이 좌굴후 내력이 30%로 저하되었을때 기둥손실에 따 른 연직방향 변위의 추이를 살펴보면 원래의 기둥부재 5개가 건전한 상태에 비하여 기둥부재가 소실되었을 경우 에너지흡수 능력이 급격히 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 상부 강체 보의 회전 구속인 경우와는 다르게 기둥제거의 개수 보다 위치 별로 차이가 있음을 알수 있다.

또한 기둥부재의 손실 개수와 위치 별로 연직하중을 지지할 수 있는 하중전달능력 의 저하와 더불어 변형능력 또한 동시에 저하함으로써 구조물 전체의 에너지흡수능력 이 감소하였다. 단, 그림 3.29에서 보는 바와 같이 타입8의 결과를 보면 2개의 기둥이 손실 되었어도 1개의 기둥이 손실 된 경우의 연직변위가 비슷하였다. 이는 보의 회전 이 에너지 흡수 능력과 변위에 대한 변수가 됨을 알 수 있었다.

- 45 -

3.5 고찰

각 기둥제거별 1층 4스팬의 프레임에 대한 연직하중과 연직변위간의 관계에서 에너 지흡수능력을 평가하였다. 상부강체 보의 회전 구속과 자유에 따라 비교하면 먼저, 보 의 회전을 구속한 경우에는 기둥 제거의 위치에 관계없이 제거 개수에 따라 에너지 흡 수량이 감소됨을 알 수 있었다. 또한 기둥이 같은 개수로 제거 되었을 때 미소하게 에 너지 흡수량이 다르다. 이는 중간기둥과 구석기둥의 제거 타입을 살펴보면 알 수 있듯 이 각 기둥간의 위치 거리에 상관없이 집중된 배열에 따라 다름을 추측할 수 있었다. 다른 한편으로, 보의 회전을 구속하지 않은 경우 기둥의 제거 개수와 위치에 따른 서 로 다른 추이를 볼 수 있었다. 보가 강체이므로 처짐이 발생하지 않지만 회전의 효과 를 통해 각 위치별에 따른 결과를 낼 수 있었다.

제4장 극한해석에 의한 연직 하중 지지 능력평가

4.1 감도해석

구조물을 구성해 있는 부재가, 구조물 전체의 하중 지지 능력에게 주는 영향도는, 구조물의 리던던시와 깊이 관계하고 있다. 그리고 구조물 골조의 하중 지지 능력에 주 는 영향도를 부재감도(Sensitivity Index, S.I.)라고 정의하여 부재 소실 전후에 있어서 의 구조물 골조의 하중 지지 능력의 변화율을 평가한다.

4.2 극한해석

Livesley에 의해서 제안된 Compact Procedure Method(이하 CP법)을 일반화 하여 그 개요를 설명하고자 한다.

부재는 모두 평면 구조내의 직선부재로 하여 축력과 휨모멘트에 관한 탄성변형이 소 성변형과 비교하여 작아서 무시할 수 있는 강소성 거동으로 가정한다. 또, 축력과 휨 모멘트의 상관관계는 무시하여, t^L, t^U,mp^L,mp^U를 부재치수와 재료의 항복응력에만 의 존성이 있는 일정값으로 가정한다. 그림 4.1에 부재의 강소성 거동을 나타낸다. 여기 서, t^U는 부재의 인장력에 대한 한계값이고, t^L은 부재의 압축력에 대한 한계값이고, mp^L은 음의 부호의 경우의 전소성 모멘트이고, mp^U는 양의 부호의 경우의 전소성 모 멘트를 나타낸다.



- 47 -

극한 해석이란, 비례재하를 받는 구조물이, 붕괴시에 단위 비례 하중의 몇 배(λc)의 하중을 받을 수 있을까를 요구하는 것이다. 붕괴 하중 계수 λc를 요구하는 문제는, 하 계 정리에 근거하여 선형 계획법을 이용하고, 다음과 같이 정식화된다.

「균형 방정식(1)과 부재력의 제약 조건식(2)을 만족하는 부재력 벡터[r]이 구해지면, 대응하는 하중 계수λ는 진정한 붕괴 하중 계수의 하계이다. 따라서 (1), (2) 식을 함께 만족하는 최대의 하중 계수가 붕괴 하중 계수와 동일하다」

CPM을 정식화 하면 다음과 같다.

Maximize λ	(1)
Subject to $\lambda \{P_0\} = [Con.] \bullet \{M\}$	(2)
소성조건 $ M_j \leq M_{pj}$	(3)

여기서, λ : 붕괴하중계수
$$\{P_0\}$$
 : 절점하중벡터의 기저치 $[Con.]$: 접속메트릭스 $\{M\}$: 부재력(내력) 벡터 M_{pj} : 부재내력.

(1) 식의 매트릭스[H]의 차원을 m행 n열로 하면, 통상은 부정정구조물이기 때문에 m<n이다. 최초로, Gauss-Jordan의 쓸어 내 법에 따라 n열 중 m열을, 단지 1개의 1과 나머지는 0뿐인 열로 변환한다. 이것을, H*매트릭스로 한다. 다음에, [r]의 성분을 2개의 타입, 즉, 기저 변수와 비기저 변수로 나눈다. 그 나누는 방법은, 기저 변수를 변환한 H*매트릭스의 1을 1개포함한 열에 관계하는 것과 비기저 변수를 배열이 되지 않은 H*매 트릭스의 열에 관계하는 것으로 한다.

이상과 같은 준비 계산하에서, 붕괴 하중 계수λ의 계산 과정은, 초기값으로서 λ=0, r_j의 모두에 대해서, r_j=0으로 일어나 이하의 2개의 스텝을 반복한다. 여기서, _j는 전비기저 변 수를 나타내는 첨자 기호이다.

- 48 -

스텝 1 : λ의 증분

기저변수의 값만 변화시켜, 그 중의 하나가 경계치에 도달할 때 까지 λ를 증가시킴

스텝 2 : 기저변수와 비기저변수의 재작성

λ를 더욱 증가시키기 위해서 기저변수와 비기저변수를 교환한다. 스텝 2를 실행할 수 없게 되었을 경우, 다시말해 λ을 증가시키는 비기저 변수가 존 재하지 않는 경우, 붕괴시에 상당하는 λ의 최대치에 도달해, 해를 얻을 수 있게 된다. 이 시점에서 비기저 변수가 되어 있는 것의 집에서, rj=r^U 또는 rj=-r^L인 것이 소성한지 이며, 이것이 붕괴 기구를 나타낸다. 모든 비기저 변수가 소성한지이면, 충분히 붕괴되 며, 얻을 수 있던 r는 붕괴시의 응력을 나타낸다. 비기저 변수가운데 소성한지가 아닌 것(rj=0)이 남아 있으면 부분 붕괴이며, 소성한지 이외의 점의 응력은 붕괴시의 외력과 어울리는 가능한 응력 분포의 하나를 나타내는 것에 지나지 않는다. 일반의 다층 다스 팬의 프레임에서는 대부분이 부분 붕괴가 된다.

다음에, 붕괴 하중의 계산 과정에 포함되는 역학적 의미에 대해 설명한다.

스텝 1의 하중의 증분에 대해서 기저 변수만을 변화시키는 것은, 비기저 변수에 대 응하는 부재 단면에 「절단」 힌지를 넣어서 할 수 있는 「정정구조물」을 풀고, 부재 력과 하중의 증분을 요구하는 것이다. 비기저 변수인 부재력의 위치가 정정기본형을 구성하기 위해서 「절단」을 넣는 위치이며, 비기저 변수의 값이 거기에 작용하는 「부정정력」이다.

이상, 붕괴 하중의 계산은, 최초 부정정구조물로부터 정정기본형을 작성하고 부정정 력을 일정값에 유지해 하중 증분을 계산하여 다음에 정정기본형을 변경하고 한층 더 하중을 증대시킬 수 있을지를 검토한다.

덧붙여 이 닫는 「절단」 부분은, 닫았을 때에 하중에 의해서 발생하는 부재력의 증감 방향을 알 수 있으므로, 하중 계수를 증대할 수 있는 「닫는」 부분을 선택할 수 있다. 이것을 선택할 수 없을 때가, 하계 정리보다 하중 계수가 최대값에 이르렀을 때로 붕 괴 하중이 된다.

- 49 -

4.3. 부재감도

골조의 원래 상태에 있어서의 하중 지지 능력 λ₀에 대해, 어느 부재가 소실한 골조 상태의 하중 지지 능력 λ_{damage}를 평가해, 그 저하율을 부재 감도(Sensitivity Index)로 하여 아래의 식에서 주어지는 것이라고 정의한다.

Sensitivity Index: S.I. =
$$\frac{\lambda_0 - \lambda_{damage}}{\lambda_0}$$

대상 부재가 소실해도 연직 하중 지지 능력이 거의 변화하지 않는 경우, 부재 감도가 매우 작아져, 골조의 하중 지지 능력에 대한 지배도가 작은 부재 말한다. 한편, 부재 감도가 큰 부재가 소실하는 경우, 그 자리에서 골조의 일부에 붕괴가 생긴다. 즉, 이 부재 감도가 크면, 그 부재는 키 엘리먼트이다고 생각할 수 있다.

골조가 있는 부재가 소실했을 경우, CP법에서는 대응하는 부재에 관한 평형 매트릭스의 열과 부재력 벡터의 변수를 균형식으로부터 제거해, 극한 해석을 실행하면 된다.



그림 4.2 극한해석

4.4 극한해석모델

1층 4 스팬 평면프레임에 대한 극한해석(Limit Analysis)를 실시하여 연직하중의 저 하 정도를 검토하였다. 그림 4.3과 같이 12차 부정정 구조인 1층 4스팬 프레임에 연 직 방향으로 등분포하중과 같은 재하를 위하 각 경간의 강보 중앙과 기둥상부에 집중 하중을 받고 있는 것으로 가정한다. 단, 양 끝의 기둥상부에는 하중을 1/2 만큼 재하 하는 것으로 한다.



그림 4.3 극한해석모델

전소성모멘트를 구하기 위한 강재의 항복강도와 소성단면계수의 상관식은 다음의 식 (4.1)과 같다.

$$M_{p} = F_{y} \times Z_{y} \tag{4.1}$$

여기서, M_p : 전소성모멘트 F_y : 강재의 항복강도(N/mm²) Z_y : 소성단면계수(mm³)



그림 4.4 지점고정 보-기둥 압축모델

그림 4.4는 1층 4경간의 해석모델의 지지상태 및 접합조건을 검토하기 위한 지점고 정 보-기둥 압축모델이다. 기둥이 지점에 고정해 있고 보와 강접합이면서 기둥 상단에 수평력이 고려되지 않고 연직 하중을 가하게 되면, 각 기둥은 대칭 좌굴모드로 휨이 발생하게 된다. 또한 하중을 직접적으로 받지 않은 보는 기둥과의 강접합에 따른 휨모 멘트에 따라 보는 수평방향 이동이 허용된 처짐이 발생하게 된다.

- 52 -



- 53 -



- 54 -

타입1과 타입4 그리고 타입7과 같은 경우에는 소성힌지 발생 지점이 부분적으로 나 와 있는데 이것은 CPM에서의 붕괴하중 계산과 관련이 있다. 이는 최초의 부정정구조 물로부터 정정기본형을 작성하고, 부정정력을 일정치로 한 채 하중중분을 계산하고, 정정기본형을 변경해서 더욱 하중을 증대시킬 수 있는가를 검토하는 조작과 같은데, 닫힌 「절단」부분은 단힌 때의 하중에 의해 생긴 부재력의 증감방향을 알고 있으므 로, 하중계수를 증대할 수 있는 「닫힌」부분을 선택할 수 있다. 이것을 선택할 수 없 을 때가 하중계수가 최대치에 도달할 때이고, 하계정리에 의해, 이것이 붕괴하중으로 된다. 또한 어떤 정정기본형을 선택해도, 하중계수를 더 이상 증대시킬 수 없으면, 붕 괴에 도달한 것으로 판정하고 이 판정이 가능한 것은 절단위치를 바꾸어 새로운 정정 기본형을 만들었을 때, 부재력의 변화에 따라서 하중계수가 증대하는지 아닌지를 알 수 있기 때문이다. 이것으로 회전하는 힌지가 부정정차수보다 하나 많이 있는 붕괴기 구를 충분붕괴라 하고, 회전하는 힌지의 수가 그보다 적을 때는 소위 부분붕괴로, 붕 괴하중과 평형을 이루는 가능한 응력상태의 하나를 나타내는 것이다. 일반의 다층다스 팬의 골조에서는 거의 부분붕괴로 되는데. 타입1과 타입4, 타입7의 경우가 이러한 부 분붕괴라 할 수 있겠다.

각 타입별 결과를 아래의 표 4.1에 나타내었다.

Туре		하중계수	λ_{damage}	S./	붕괴형태
		λ	λ_0		()안은 소성힌지 발생 개수
	I	75.625	_	_	부분붕괴 (4)
기둥 1개 손실	П	60.496	0.8	0.2	부분붕괴 (2)
	III	53.136	0.70	0.297	충분붕괴 (8)
	IV	45.574	0.60	0.397	충분붕괴 (8)
기둥 2개 손실	V	37.961	0.5	(기둥 ③+④) 0.498	충분붕괴 (6)
	VI	30.4	0.4	(기둥 ③+⑤) 0.598	충분붕괴 (6)
	VII	22.838	0.3	(기둥 ④+⑤) 0.717	충분붕괴 (6)
	VIII	45.372	0.6	0.4	부분붕괴 (2)

표 4.1 극한해석 결과

- 55 -



4.6 극한해석결과와 비선형유한요소해석 결과의 비교

그림 4.13 극한해석과 비선형유한요소해석 결과 비교

그림4.13 에서는 2장의 비선형 유한요소해석 결과와 극한해석 결과값을 비교하였다. 보가 회전 구속일 경우 비선형 유한요소의 해석값은 기둥부재 1개가 손실되었을 경우 기둥부재의 손실위치와는 상관없이 동일한 하중지지 능력을 나타냈었으나 보가 회전 할 경우의 비선형 유한요소의 해석값과 극한해석 값은 손실된 기둥부재의 위치에 따라 서로 다른값을 나타내고 있다.

그 원인으로는 보를 구속한 비선형유한요소 해석에서 기둥붕괴형으로 상부의 보를 강체(Rigid) 모델링하여 강체의 회전없이 균일하게 변동되어(회전구속) 손실 되고 남은 기둥부재의 협력 효과를 정확히 시뮬레이션 할 수 없었으나 보의 회전을 허용하여 해 석한 결과는 CPM을 이용한 극한해석과 동일하게 기둥 손실 위치에 따른 강체의 회전 효과가 고려되어 보다 정밀한 하중지지능력의 평가가 가능하였다.

- 56 -

제5장 결론

본 논문에서는, 우발적인 하중이 가해졌을 때 개별적인 부재레벨에서 전체구조물의 하중지지능력을 평가하여 구조물의 붕괴메커니즘을 컴퓨터 시뮬레이션하였다. 또한, 1층 4스팬의 강보약기둥 프레임에 대하여 기둥부재 손실에 대한 에너지 저하 추이를 검토하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1. H형 강기둥의 좌굴 후 거동을 파악하기 위하여 비선형유한요소해석을 실시하여 재 하실험 값과 비교하였다. 뿐만 아니라, 힌지모델에 의한 부재의 축력과 변형량의 관 계 및 Paris의 식과 비교한 결과 매우 근접한 해석결과를 얻을 수 있었다.
- 양단힌지 및 양단고정조건 단일 H형강 기둥에 대한 비선형유한요소 시뮬레이션을 통하여 좌굴 후의 거동을 정확하게 예측할 수 있었으며 향후 부재의 소성 변형에너 지의 변동추이를 이용한 진행성 붕괴방지 연구에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것 으로 판단된다.
- 3. 1층 4스팬 프레임의 비선형 유한요소 시뮬레이션을 통하여 기둥부재의 손실 위치 및 개수에 따른 좌굴 후 에너지 흡수능력의 추이를 분석하였다. 기둥부재의 손실과 더불어 하중전달능력 및 변형능력이 동시에 저하하여 구조물의 에너지흡수능력 또한 급격히 감소하였다.

4. 유한요소해석과 극한해석 결과값을 비교한 결과, 보를 강체로 모델한 비선형 유한 요소의 해석값에서 보의 회전을 구속했을 경우 기둥부재 1개가 손실되었을 경우 기둥 부재의 손실위치와는 상관없이 동일한 하중지지 능력을 나타냈었으나 보를 회전을 자 유로 한 비선형 유한요소해석값과 극한해석 값은 손실된 기둥부재의 위치에 따라 서로 다른값을 나타내고 있다.

그 원인으로는 비선형유한요소 해석에서 기둥붕괴형으로 상부의 보를 강체(Rigid) 모델링하여 강체의 회전없이 균일하게 변동되어(회전구속) 손실 되고 남은 기둥부재의 협력 효과를 정확히 시뮬레이션 할 수 없었으나 보의 회전이 허용된 비선형유한요소 해석과 CPM을 이용한 극한해석에서는 기둥 손실 위치에 따른 강체의 회전효과가 고 려되어 보다 정밀한 하중지지능력의 평가가 가능하였다.

- 57 -

참고 문 헌

국내논문

- 1. 김규석, H형 강주의 내력에 관한 연구, 대한건축학회지, 제19권 제64호 pp54~61, 1975
- 2. 김진구, 정민강, 메가프레임 건물의 연쇄붕괴 성능평가, 대한건축학회논문집 구조계, 제26권 제10호, pp.45~52, 2010
- 노희일, 문태섭, 이리형, 김영석, 중심축력을 받는 강주의 탄소성 거동, 대한건축학회 지, 제26권 제106호, pp.58~66, 1982
- 박재우, 홍영균, 홍기섭, 이성희, 최성모, 탄소섬유쉬트로 구속된 콘크리트충전 각형 강관기둥의 단조압축실험, 한국강구조학회 논문집, 제21권 제3호, pp311~320, 2009
- 5. 오명호, 김명한, 김상대, 철골-콘크리트 합성기둥의 후좌굴 거동에 관한 해석 연구, 한국강구조학회 논문집, 제19권 6호, pp.725~735, 2007
- 이경구, 폭발하중을 받는 강재압축재의 잔여저항성능 평가, 대한건축학회논문집 구조 계, 제26권 제10호, pp.37~44, 2010
- 이철호, 김선웅, 이경구, 한규홍, 붕괴스펙트럼을 활용한 용접철골모멘트골조의 비선 형 동적 연쇄붕괴 근사해석, 한국강구조학회 논문집, 제21권, 제3호, pp.267~275, 2009

국외논문

8. Ben Kato, Hiroshi Akiyama, Keihiko Inoue, Post-buckling Behavior of Short Steel Columns, Transactions of the Architectural Institute of Japan, Vol.299, pp.67~76, 1975

- 58 -

9. P.C. Paris, Limit Design of Columns, Journal of The Aeronautical Sciences, Vol. 21, pp.43~49, 1954

10. R.K. Livesley, Introduction to matrix structural analysis, Baifukan, 1968

11. Shanley. F.R, The Column paradox, Journal of Aeronautical Science, Vol. 13, December, pp. 261-264, 1946

Shanley. F.R, Inelastic Column Theory, Journal of Aeronautical Science, Vol.
May, pp. 261-264, 1947

13. Takumi Ito, Ken'ichi Oi, Zhenglin Li, A Sensitivity Analysis Related to Redundancy of Framed Structures Subjected to Vertical Loads, Journal of Structural and Construction Engineering, Vol., No. 539, pp.145~151, 2005

14. Zhenglin Li, Ken'ichi Oi, Takumi Ito, Sensitivity Analysis on Vertical Load Carrying Capacity of Framed Structures to Member Disappearance, Journal of Constructional Steel, Vol. 11, No., pp.325~332, 2003

15. Zhenglin Li, Ken'ichi Oi, Ken'ich Kawaguchi, Jae-hyouk Choi, Progressive Collapse Prevention of Multi-story Frames Damaged by Accidental Actions, Journal of Constructional Steel, Vol. 13, No., pp.601~604, 2005

16. Z.P. Bažant, Y. Zhou, Why Did the World Trade Center Collapse? -Simple Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, pp.2-6, 2002

- 59 -
부록

1. 비선형유한요소해석 장비 및 프로그램 사진



그림 1. 비선형유한요소해석 워크스테이션



그림 2. 비선형유한요소해석 프로그램

- 60 -

2. 강체 보의 회전이 구속인 1층 4경간 프레임의 좌굴변형과정



- 61 -



- 62 -







- 64 -







- 66 -







- 68 -

3. 강체 보의 회전이 자유인 1층 4경간 프레임의 좌굴변형과정



- 69 -



- 70 -



- 71 -



- 72 -







- 74 -



- 75 -



- 76 -

저작물 이용 허락서					
학 과	건축공학과	학 번	20097274	과 정	석사
성 명	한글: 박 훤 모 한문 : 朴 烜 模 영문 : Park Hwon Mo				
주 소	광주광역시 북구 임동 한국아델리움 201동 705호				
연락처	E-MAIL : hwonmo.park@gmail.com				
한글 : 연쇄붕괴망지를 위한 H형강의 좌굴후 에너지흡수 등력 평가에 관한 연구 논문제목 영어 : Evaluation on the Post-buckling Energy Absorption of H-Shaped Steel Column for Prevention Progressive Collapse					
본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.					
 - 다 음 - 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집 · 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포 · 전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송 · 출력을 허락함. 					
동의여부 : 동의(〇) 반대()					
2011 년 2 월					
저작자: 박 훤 모 (인)					
조선대학교 총장 귀하					