

# 접합부 비선형 거동을 고려한 강구조 비가새 골조의 안정성

## The Stability of Steel Unbraced Frames Considering Nonlinear Behavior of Connections

김 희 동<sup>1)</sup>

Kim, Hee Dong

요약 : 강구조 비가새 골조의 접합부로서 반강접합부를 적용하게 되면 접합부의 비선형적인 모멘트-회전각 관계는 강구조 비가새 골조의 거동(P- $\Delta$  효과) 및 안정성에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 접합부 비선형 거동이 골조의 거동 및 안정성에 미치는 영향을 2차 비탄성 해석을 통하여 고찰하고, 안정성에 영향을 미치는 주요 인자 및 그 경향들을 분석하였다. 연구 결과 접합부의 비선형 거동은 골조의 안정성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며 주요 영향인자는 접합부의 회전강성, 반강접합부의 적용 위치 등으로 나타났다.

ABSTRACT : The nonlinear behavior of a connection has an influence on the behavior (the P- $\Delta$  effect) and the stability of a steel unbraced frame when a semi-rigid connection is applied as a beam-to-column connection. Therefore, the effects of a connection's non-linear behavior on the behavior and stability of a steel unbraced frame were investigated using second-order inelastic analysis, after which the main influence factors and their behavioral tendencies were studied. The study results showed that the nonlinear behavior of a connection directly affects the stability of a steel unbraced frame, and that the main influence factors are the rotational stiffness of the connection and the location of a semi-rigid connection.

핵심용어 : 접합부 비선형 거동, 비가새 골조, 2차 비탄성 해석, 안정성

KEYWORDS : Nonlinear behavior of connection, Unbraced frame, Second order inelastic analysis, Stability

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

최근 접합부 강성 조절을 통해 강구조 골조 내부의 모멘트 분배를 효율적으로 하여 구조 설계시 경제성을 확보하는 반강접합부에 관한 연구 및 관심이 확대되고 있다.

하지만 이러한 반강접합부의 적용은 접합부 비선형 거동을 유발할 수 있으며, 이러한 접합부 비선형 거동은 구조부재 및 접합부 자체의 강성만으로 수평하중에 저항하는 비가새 골조의 경우 골조 전체의 거동 및 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

따라서 이러한 접합부 비선형 거동을 고려한 강구조 비가새 골조의 안정성 평가는 최근 관심이 증가하고 있는 반강접합부를 강구조 비가새 골조의 설계시 실제 적용하기 위해 중요

한 의미를 가지리라 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 2차 비탄성 해석을 통하여 반강접합부를 가진 강구조 비가새 골조의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 구조적 요소들을 파악하고, 파악된 영향인자들이 골조의 안정성에 미치는 영향을 평가하여 추후 강구조 비가새 골조의 설계시 기초 자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

#### 1.2 연구방법

본 연구에서는 반강접합부의 비선형 거동이 강구조 비가새 골조의 안정성에 미치는 영향을 해석적으로 평가하기 위해 접합부의 비선형 거동을 고려할 수 있는 2차원 2차 비탄성 해석 프로그램을 개발하고, 기존의 연구를 통하여 파악된 골조의 안정성에 영향을 미치리라 사료되는 다양한 구조적 변수에 대해 수치해석을 수행한다.

1) 정회원, 중앙대학교 건축공학과 강사, 공학박사  
(Tel. 031-670-4671, Fax. 031-675-1387, E-mail: drkimhd@hanafos.com)

본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

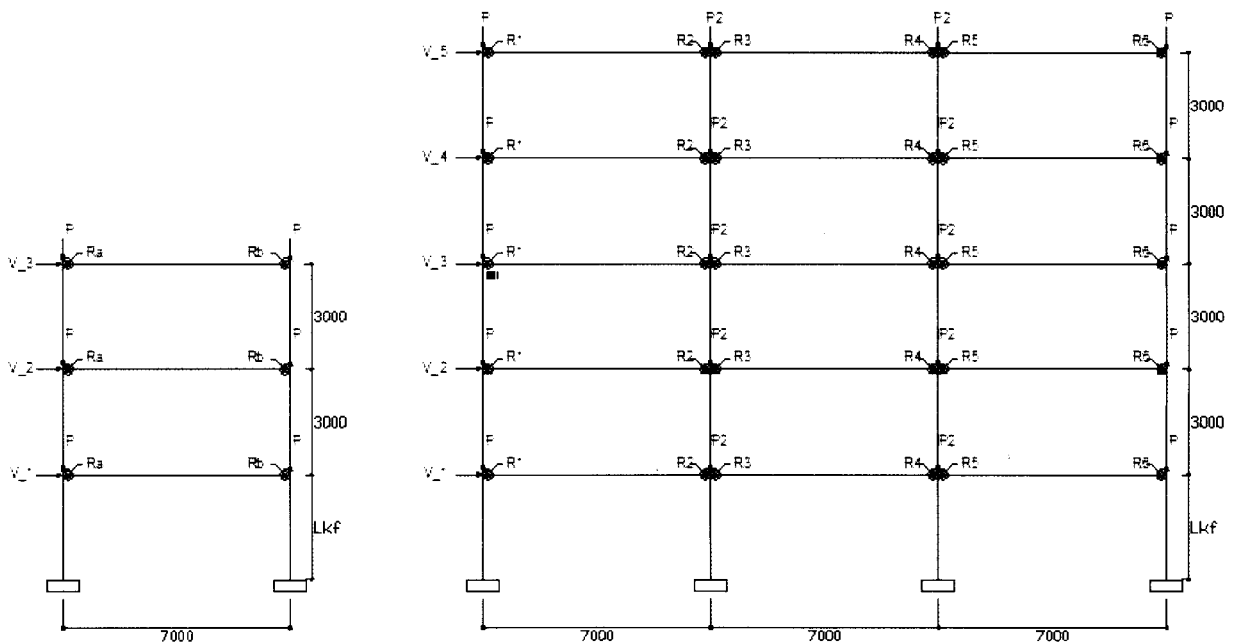


그림 1. 해석 대상 골조 (3층 1스팬 골조, 5층 3스팬 골조)

수행된 해석 결과를 각 주요 구조 거동 별로 고찰하여 최종적으로 접합부의 비선형 거동이 강구조 비가새 골조의 안정성에 미치는 영향을 평가해보고자 한다.

## 2. 2차 비탄성 해석 수행

### 2.1 해석 프로그램

반강접합부의 비선형 거동을 고려한 2차 비탄성 해석 수행을 위해 본 연구에서는 FORTRAN을 이용 2차원 2차 비탄성 해석 프로그램을 개발하였다(H.D.Kim 등, 2005).

본 연구에 적용된 해석 프로그램의 개요는 다음과 같다.

#### 1) 해석 가능 범위

2차원 2차 비탄성 해석

반강접합부 적용에 의한 접합부 비선형 거동 고려  
최대 내력 도달 이후 거동 추적

#### 2) 기하학적 비선형

안정함수(stability function) 적용

Large displacement and small strain 해석  
bowing effect (curvature shortening) 고려  
Initial imperfection의 영향은 없는 것으로 가정

#### 3) 재료적 비선형

수정소성힌지법(refined plastic hinge method) 적용  
축력에 의한 단면의 소성강도 변화 고려  
잔류응력( $0.3\sigma_y$ )을 고려한 단면의 점진적 소성화 고려

#### 4) 반강접합부의 비선형 거동

3 parameter model 적용

Top and seat angle type 반강접합부 적용

#### 5) 최대내력 도달 이후 거동

호각법(arc length method) 적용

### 2.2 해석 대상 골조

본 연구에 적용된 해석 대상 골조를 그림 1에 나타내었으며 기본적인 사항은 다음과 같다.

#### 1) 골조의 형상

2차원 강구조 비가새 골조

위치 및 용도 : 서울 시내, 일반 오피스 빌딩  
골조의 규모 (층/스팬) : 3 / 1, 5 / 3

#### 2) 부재 단면

H 형강 단면

#### 3) 지점 조건

고정단

#### 4) 기둥-보 접합부

완전 고정 또는 반강접합부 (Top & Seat angle)

#### 5) 하중 조건

정적하중 (강축방향 가력)

축력은 일정 하중을 유지하고, 수평력이 일정 비율로 증가 또는 감소함

표 1. 수치 해석 변수

변수	기둥 단면 (L)	기둥 단면 (R)	축력 (kN)	$L_{kf}$ (cm)	$R_L$ (kN.cm/rad)	$R_R$ (kN.cm/rad)	변수	기둥 단면 [out]	기둥 단면 [in]	축력 (kN)	$L_{kf}$ (cm)	$R_{out}$ (kN.cm/rad)	$R_{in}$ (kN.cm/rad)
C1_P1	A	A	149.6	300	고정단	고정단	C2_M1O	B	C	84.6	300	고정단	고정단
C1_P3	A	A	299.1	300	고정단	고정단	C2_M3O	B	C	197.4	300	고정단	고정단
C1_L1	A	A	149.6	600	고정단	고정단	C2_M1I	C	B	84.6	300	고정단	고정단
C1_L3	A	A	299.1	600	고정단	고정단	C2_M3I	C	B	197.4	300	고정단	고정단
C1_M1	B	B	246.4	300	고정단	고정단	C2_P1_S8	C	C	84.6	300	8,818.700	8,818.700
C1_M3	B	B	492.9	300	고정단	고정단	C2_P3_S8	C	C	197.4	300	8,818.700	8,818.700
C1_P1_S8	A	A	149.6	300	8,818.700	8,818.700	C2_P1_S4	C	C	84.6	300	4,409.400	4,409.400
C1_P3_S8	A	A	299.1	300	8,818.700	8,818.700	C2_P3_S4	C	C	197.4	300	4,409.400	4,409.400
C1_P1_S4	A	A	149.6	300	4,409.400	4,409.400	C2_L1_S8	C	C	84.6	600	8,818.700	8,818.700
C1_P3_S4	A	A	299.1	300	4,409.400	4,409.400	C2_L3_S8	C	C	197.4	600	8,818.700	8,818.700
C1_L1_S8	A	A	149.6	600	8,818.700	8,818.700	C2_L1_S4	C	C	84.6	600	4,409.400	4,409.400
C1_L3_S8	A	A	299.1	600	8,818.700	8,818.700	C2_L3_S4	C	C	197.4	600	4,409.400	4,409.400
C1_L1_S4	A	A	149.6	600	4,409.400	4,409.400	C2_M1O_S8	B	C	84.6	300	8,818.700	8,818.700
C1_L3_S4	A	A	299.1	600	4,409.400	4,409.400	C2_M3O_S8	B	C	197.4	300	8,818.700	8,818.700
C1_M1_S8	B	B	246.4	300	8,818.700	8,818.700	C2_M1I_S8	C	B	84.6	300	8,818.700	8,818.700
C1_M3_S8	B	B	492.9	300	8,818.700	8,818.700	C2_M3I_S8	C	B	197.4	300	8,818.700	8,818.700
C1_M1_S4	B	B	246.4	300	4,409.400	4,409.400	C2_M1O_S4	B	C	84.6	300	4,409.400	4,409.400
C1_M3_S4	B	B	492.9	300	4,409.400	4,409.400	C2_M3O_S4	B	C	197.4	300	4,409.400	4,409.400
C1_P1_S8R	A	A	149.6	300	4,409.400	8,818.700	C2_M1I_S4	C	B	84.6	300	4,409.400	4,409.400
C1_P1_S8L	A	A	149.6	300	8,818.700	4,409.400	C2_M3I_S4	C	B	197.4	300	4,409.400	4,409.400
C2_P1	C	C	84.6	300	고정단	고정단	C2_P1_Sout	C	C	84.6	300	4,409.400	8,818.700
C2_P3	C	C	197.4	300	고정단	고정단	C2_P3_Sout	C	C	197.4	300	4,409.400	8,818.700
C2_L1	C	C	84.6	600	고정단	고정단	C2_P1_Sin	C	C	84.6	300	8,818.700	4,409.400
C2_L3	C	C	197.4	600	고정단	고정단	C2_P3_Sin	C	C	197.4	300	8,818.700	4,409.400

[주] 보 부재 : H-400x200x8x13, 기둥 부재 : H-200x200x8x12 [A], H-250x255x14x14 [B], H-300x300x10x15 [C]

6) 제약 조건

면외변형은 고려하지 않음

국부좌굴의 영향은 고려하지 않음

3. 2차 비탄성 해석 결과

3.1 해석 결과 및 고찰 대상

2.3 해석 변수

해석적 연구에 적용된 주요 변수를 표 1에 나타내었다. 적용된 주요 변수는 접합부의 회전강성, 반강접합부의 위치, 축력비, 기둥재 강성 등이다.

이들 중 반강접합부의 회전강성은 접합부의 최대저항모멘트가 연결된 보 부재에 전소성모멘트( $M_{pb}$ )의 80%인 경우와 40%인 경우를 변수로 설정하였다.

그리고 기둥단면과 접합부 회전강성의 아래첨자 [L],[R]은 3층 1스팬 골조의 좌측( $R_a$ )과 우측( $R_b$ ) 회전강성을 나타내며, [in], [out]은 5층 3스팬 골조의 내부( $R_{2, 3, 4, 5}$ )와 외부( $R_{1, 6}$ ) 회전강성을 나타낸다. 그리고  $L_{kf}$ 는 각 해석 골조의 최하층 기둥재의 길이를 나타낸다.

2장에서 기술된 것과 같이 해석 대상 골조에 다양한 구조적 변수를 적용하여 2차 비탄성 해석을 수행하였다.

해석 수행 결과 중 접합부 회전강성이 작은(4 series) 경우의 최상부층 수평하중-최상부층 수평변위 관계를 그림 2에서 그림 8까지 나타내었다.

그리고 접합부의 비선형 거동이 강구조 비가새 골조의 거동 및 안정성에 미치는 영향을 효율적으로 평가하기 위하여 수치 해석을 통하여 파악된 결과들은 기존의 연구(H.D.Kim 등, 2005 ; 김희동 등, 2004)를 통하여 파악된 골조의 거동 및 안정성을 평가할 수 있는 주요 대상 별로 나누어 표 2에 나타내었으며 결과 고찰시 각 대상별로 해석 결과를 고찰하였다. 본 연구에 적용된 해석결과의 주요 고찰 대상의 개념은 그림 9와 같다.

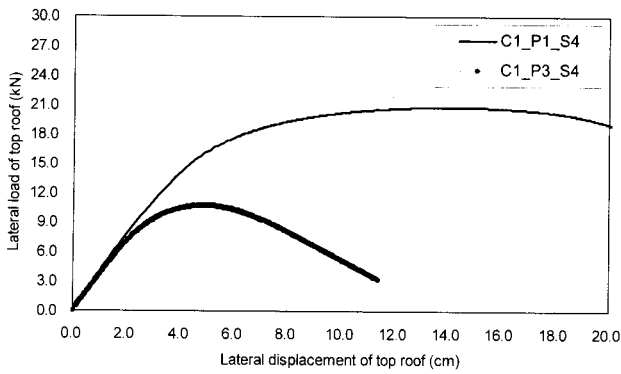


그림 2. 3층 1스팬 골조의 P\_S4 series의 횡하중-횡변위 관계

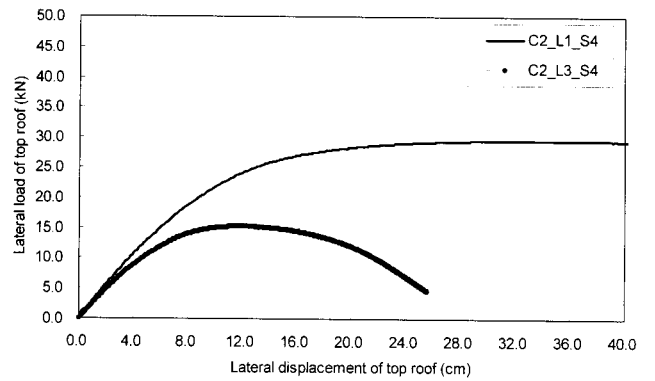


그림 6. 5층 3스팬 골조의 L\_S4 series의 횡하중-횡변위 관계

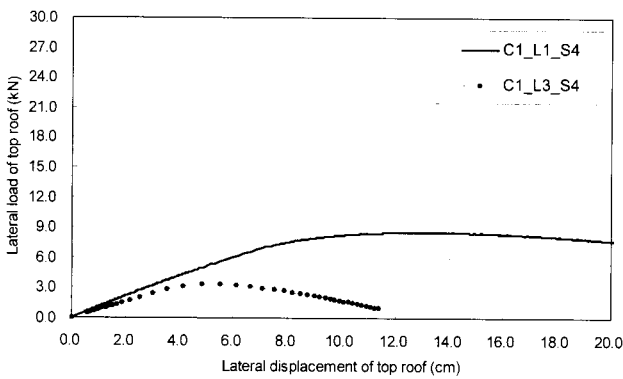


그림 3. 3층 1스팬 골조의 L\_S4 series의 횡하중-횡변위 관계

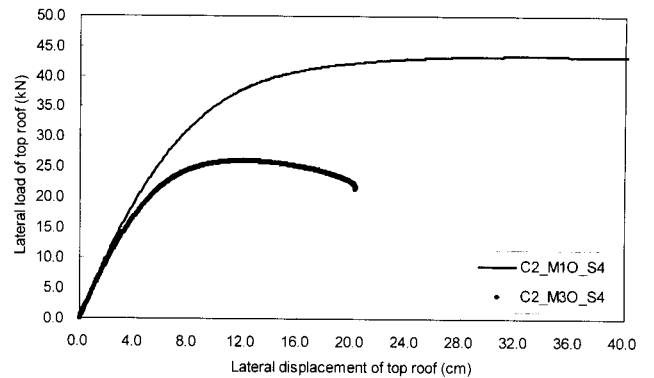


그림 7. 5층 3스팬 골조의 MO\_S4 series의 횡하중-횡변위 관계

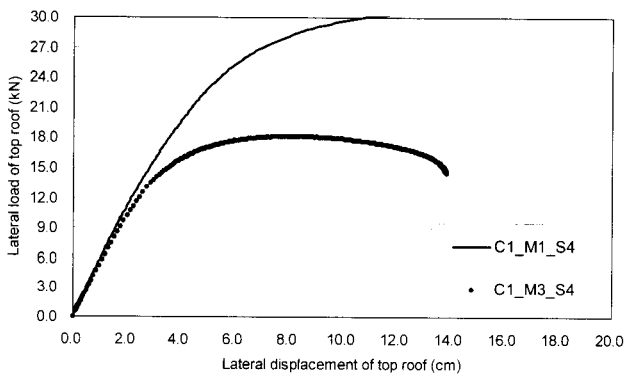


그림 4. 3층 1스팬 골조의 M\_S4 series의 횡하중-횡변위 관계

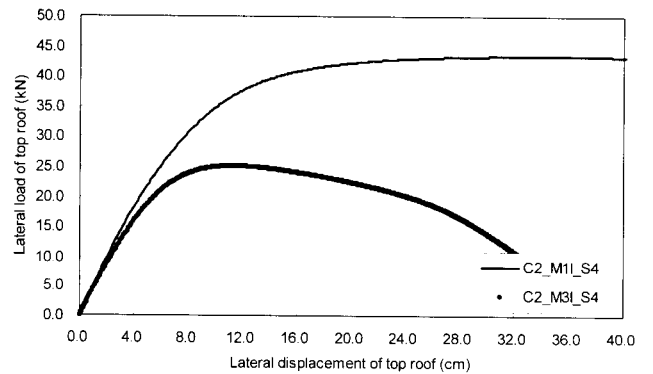


그림 8. 5층 3스팬 골조의 MI\_S4 series의 횡하중-횡변위 관계

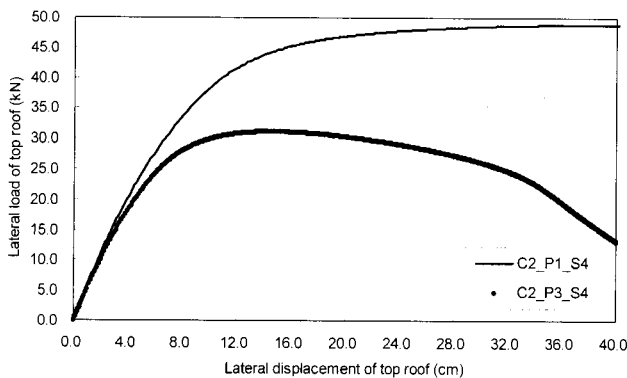


그림 5. 5층 3스팬 골조의 P\_S4 series의 횡하중-횡변위 관계

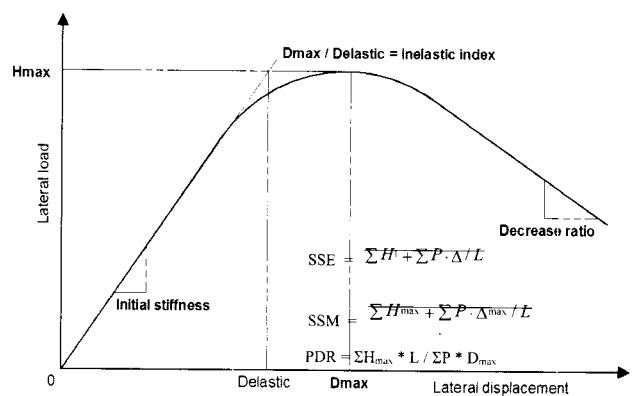


그림 9. 해석 결과 고찰 대상

표 2. 수치 해석 결과

변수	최대 수평 하중 [H <sub>max</sub> ] (kN)	최대수평 하중시 수평변위 [D <sub>max</sub> ] (cm)	초기 강성 [IS] (kN/cm)	비탄성 지수 [IDX]	수평 하중 감 소율 [LDR] (%)	탄성 응강성 [SSE] (kN/cm)	최대수평 하중시 총강성 [SSM] (kN/cm)	P-Δ 모멘트 비 [PDR]	변수	최대 수평 하중 [H <sub>max</sub> ] (kN)	최대수평 하중시 수평변위 [D <sub>max</sub> ] (cm)	초기 강성 [IS] (kN/cm)	비탄성 지수 [IDX]	수평 하중 감 소율 [LDR] (%)	탄성 응강성 [SSE] (kN/cm)	최대수평 하중시 총강성 [SSM] (kN/cm)	P-Δ 모멘트 비 [PDR]
C1_P1	23.6	6.3	5.6	1.50	-0.06	64.1	32.6	9.90	C2_M1O	69.9	12.2	8.7	1.51	-0.10	318.8	122.3	13.45
C1_P3	11.8	3.1	5.3	1.41	-0.13	62.1	36.5	5.10	C2_M3O	35.0	6.3	8.1	1.46	-0.27	299.9	129.1	5.54
C1_L1	9.4	9.8	1.3	1.37	-0.03	9.3	6.9	3.63	C2_M1I	66.3	18.0	7.9	2.14	-0.05	300.5	85.7	9.13
C1_L3	3.6	4.2	1.0	1.20	-0.06	8.9	7.8	1.62	C2_M3I	36.1	9.5	7.1	1.88	-0.30	261.8	96.8	3.90
C1_M1	47.0	8.0	9.3	1.57	-0.11	120.9	55.6	10.28	C2_P1_S8	71.4	31.2	6.9	3.00	-0.05	297.6	64.2	6.58
C1_M3	23.9	4.1	8.7	1.50	-0.22	117.6	60.7	5.16	C2_P3_S8	41.7	12.9	6.6	2.05	-0.31	288.4	92.5	3.69
C1_P1_S8	22.9	8.2	4.7	1.69	-0.07	57.2	25.9	7.66	C2_P1_S4	48.8	39.5	5.3	4.30	-0.04	251.6	48.0	4.67
C1_P3_S8	11.3	4.0	4.4	1.57	-0.14	55.9	29.1	3.86	C2_P3_S4	31.2	14.5	5.1	2.39	-0.15	246.5	83.8	3.24
C1_P1_S4	20.8	14.0	3.9	2.64	-0.07	50.7	16.9	4.66	C2_L1_S8	37.0	22.6	3.3	2.03	-0.05	58.1	26.0	5.15
C1_P3_S4	10.8	5.0	3.7	1.73	-0.14	50.6	25.3	3.23	C2_L3_S8	17.6	9.9	2.9	1.65	-0.13	55.4	32.9	2.33
C1_L1_S8	9.0	11.2	1.2	1.49	-0.03	8.8	6.2	3.11	C2_L1_S4	29.6	33.6	2.7	3.05	-0.04	51.3	18.8	3.44
C1_L3_S8	3.5	5.1	0.9	1.34	-0.06	8.5	7.0	1.33	C2_L3_S4	15.2	11.9	2.4	1.89	-0.15	50.1	28.7	1.91
C1_L1_S4	8.5	13.1	1.1	1.65	-0.03	8.3	5.5	2.70	C2_M1O_S8	63.1	25.4	6.5	2.60	-0.05	263.0	64.3	6.60
C1_L3_S4	3.3	4.8	0.8	1.21	-0.06	8.1	7.2	1.40	C2_M3O_S8	32.8	8.6	6.2	1.62	-0.30	252.8	103.4	4.24
C1_M1_S8	43.1	16.0	7.1	2.63	-0.12	101.7	30.9	5.27	C2_M1I_S8	60.3	26.6	6.0	2.65	-0.05	252.0	61.1	6.22
C1_M3_S8	22.2	5.7	6.8	1.74	-0.23	100.5	46.6	3.73	C2_M3I_S8	30.7	12.1	5.6	2.19	-0.29	228.6	76.3	2.87
C1_M1_S4	30.8	16.3	5.6	2.99	-0.03	87.6	28.9	4.86	C2_M1O_S4	43.4	33.4	5.0	3.86	-0.04	222.5	46.9	4.55
C1_M3_S4	18.2	8.2	5.4	2.44	-	87.4	34.5	2.50	C2_M3O_S4	26.0	12.0	4.8	2.23	-0.35	217.0	77.3	2.92
C1_P1_S8R	22.1	10.4	4.3	2.01	-0.07	53.9	21.4	6.15	C2_M1I_S4	43.4	34.4	4.7	3.76	-0.04	215.8	46.1	4.44
C1_P1_S8L	22.3	10.2	4.3	1.97	-0.07	54.0	21.8	6.30	C2_M3I_S4	25.2	11.3	4.5	2.00	-0.15	201.8	84.1	3.26
C2_P1	82.7	18.2	9.4	2.07	-0.10	364.9	99.3	10.74	C2_P1_Sout	57.6	41.1	5.8	4.13	-0.05	265.8	48.0	4.67
C2_P3	47.0	8.9	8.9	1.68	-0.27	346.8	127.2	5.45	C2_P3_Sout	35.3	13.9	5.6	2.22	-0.35	261.2	86.6	3.39
C2_L1	39.2	15.2	4.2	1.61	-0.05	65.7	35.5	7.38	C2_P1_Sin	65.6	35.5	6.4	3.46	-0.04	283.9	56.8	5.71
C2_L3	18.9	8.2	3.6	1.58	-0.12	61.7	37.5	2.80	C2_P3_Sin	40.7	14.7	6.2	2.22	-0.16	277.1	84.1	3.26

### 3.2 해석 결과 고찰

#### 3.2.1 최대수평하중(H<sub>max</sub>)

##### 1) 접합부 회전강성의 영향

각 변수별 반강접합시 H<sub>max</sub>와 강접합시 H<sub>max</sub>의 비를 그림 10과 11에 나타내었다.

표 2에서 보면 접합부의 회전강성이 감소하면 H<sub>max</sub>도 감소하는 것으로 나타났다.

그리고 그림 9와 10에서 보면 축력값이 증가(P3 series) 하게 되면 접합부의 회전강성 감소에 의한 H<sub>max</sub> 감소율은 전반적으로 작게 나타났다. 이는 저축력상태에서는 접합부 회전 강성의 저하가 H<sub>max</sub> 결정에 매우 중요한 영향을 미치게 되지만, 고축력 상태에서는 P-Δ효과 등으로 인하여 축력이 H<sub>max</sub> 결정에 미치는 영향이 증가하게 되어 접합부 회전 강성 감소의 영향이 다소 낮게 나타난 것으로 판단된다.

또한 기동재 강성이 낮은 경우(L series)에도 회전강성 저하에 의한 H<sub>max</sub> 감소 폭은 다른 변수 변화와 비교하여 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 이 역시 상부에 언급한 것과 같이 기동재 강성의 변화가 H<sub>max</sub>에 미치는 영향이 커 나타난 현상이라 사료된다.

반강접합부의 위치에 따른 영향을 살펴보면, 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조 내부의 기동-보 접합부에 위치한 경우 (S<sub>in</sub> series)가 H<sub>max</sub> 감소 폭이 낮은 것으로 나타났다. 이는 회전강성이 높은 접합부가 골조의 외주부에 위치하게 되면 일종의 Tube structure와 같이 골조 외주부의 강성이 증가하여 수평하중에 저항하게 되므로 나타난 현상이라 사료된다.

##### 2) 축력의 영향

표 2를 보면 가력된 축력이 클수록 H<sub>max</sub>는 감소하는 것으로 나타났으며 특히 최하중 기동재 강성이 낮은 경우 축력이 H<sub>max</sub>에 미치는 영향은 증가하는 것으로 나타났다.

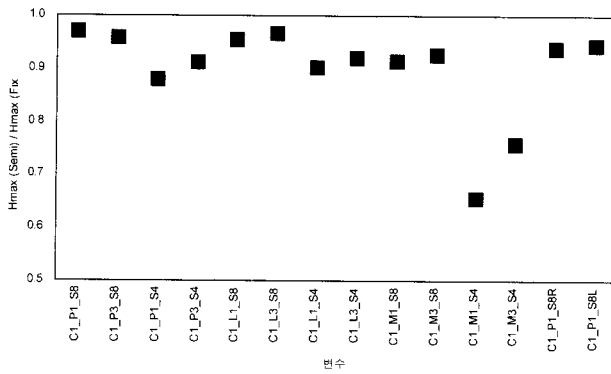


그림 10. 3층 1스팬 골조 반강접합시 H<sub>max</sub>와 강접합시 H<sub>max</sub> 비

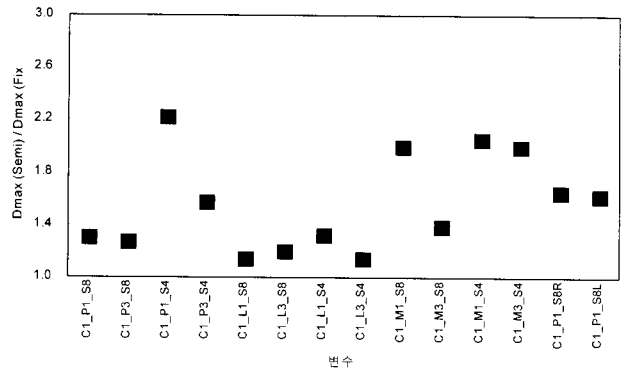


그림 12. 3층 1스팬 골조 반강접합시 D<sub>max</sub>와 강접합시 D<sub>max</sub> 비

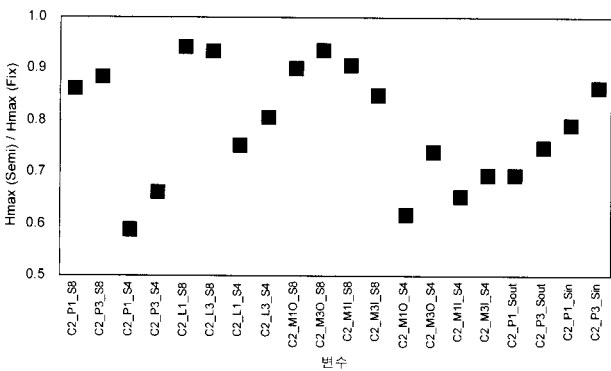


그림 11. 5층 3스팬 골조 반강접합시 H<sub>max</sub>와 강접합시 H<sub>max</sub> 비

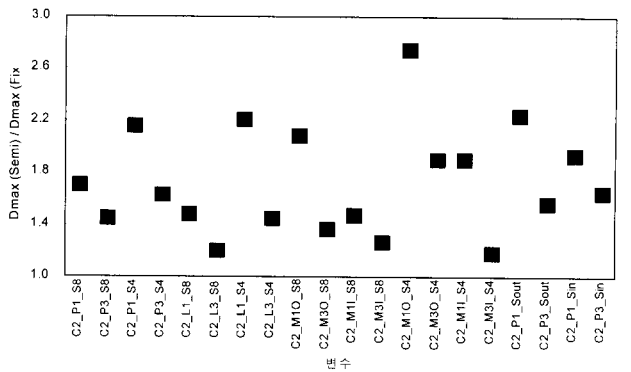


그림 13. 5층 3스팬 골조 반강접합시 D<sub>max</sub>와 강접합시 D<sub>max</sub> 비

이러한 영향은 P-Δ 효과의 영향으로 사료된다. 즉 기둥재 강성 저하로 인한 수평변위 증가로 P-Δ효과에 의한 2차 모멘트의 영향이 증가하게 되어 H<sub>max</sub> 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 3) 최하층 기둥부재 강성의 영향

표 2를 보면 최하층 기둥부재 강성이 낮을수록 H<sub>max</sub>는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 P-Δ효과에 의해 발생하여 일어나는 것으로 사료된다.

### 4) 층간 기둥강성 변화의 영향

표 2의 결과에서 골조의 동일 층 내에서 기둥재의 강성이 외주, 내주별로 변화하는 것은 접합부 회전강성의 변화와는 달리 H<sub>max</sub> 변화에 그리 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

## 3.2.2 최대수평하중시 수평변위 (D<sub>max</sub>)

### 1) 접합부 회전강성의 영향

각 변수별 반강접합시 D<sub>max</sub>와 강접합시 D<sub>max</sub>의 비를 그림 12와 13에 나타내었다.

표 2의 결과에서 보면 접합부 회전강성이 낮을수록 D<sub>max</sub>도 감소하는 것으로 나타났다.

그리고 그림 12와 그림 13을 보면 D<sub>max</sub>의 변화는 최하층 기둥재 강성과 축력비 그리고 골조 형상비(aspect ratio)에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다.

먼저 건물의 형상비가 큰 경우(3층 1스팬 골조)에는 최하층 기둥재의 강성이 낮은 경우(L series) 접합부 회전강성 저하에 따른 D<sub>max</sub>의 변화가 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 형상비가 작은(5층 3스팬 골조) 경우에는 변화가 비교적 크게 나타났다. 이는 형상비가 큰 골조의 경우 기둥재 강성 저하의 영향이 골조 전체 강성저하에 미치는 영향이 형상비가 작은 골조에 비해 크지 않아 나타난 현상이라 사료된다.

그리고 축력비가 커질수록 접합부 강성 저하가 D<sub>max</sub>에 미치는 영향이 작아지는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 H<sub>max</sub>와 같이 고축력 상태에서는 골조의 안정성에 축력(P-Δ 효과)이 미치는 영향이 증가하게 되고 따라서 충분한 변형을 하기 이전에 H<sub>max</sub>에 도달하므로 접합부 회전강성 저하의 영향이 작게 나타난 것으로 사료된다.

그리고 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조의 내부에 있는 경우가 회전강성 변화에 따른 D<sub>max</sub> 변화가 작게 나타났다.

과이 영향이 커질 경우 기둥재 강성이 작으면 작은 변형으로도 급격하게 붕괴기구에 도달할 수 있게 된다. 따라서 최하층 기둥재의 강성이  $D_{max}$ 에 미치는 영향은 축력값에 따라서 달라진다고 볼 수 있다.

4) 층간 기둥강성 변화의 영향

기둥 강성이 골조의 동일 스펠내에서 변화하는 것은 접합부 회전강성 변화와 같이 골조의 내부 기둥재의 강성이 낮은 경우가 비교적  $D_{max}$  값의 변화가 작은 것으로 나타났다.

3.2.3 초기강성 (IS)

1) 접합부 회전강성의 영향

각 변수별 반강접합시 IS와 강접합시 IS의 비를 그림 14와 15에 나타내었다.

표 2의 결과에서 보면 접합부의 강성이 낮을수록 IS가 감소하였다.

하지만 그림 14, 그림 15에서 보면 기둥재의 강성이 낮은 경우에는 접합부 회전강성의 저하가 IS에 미치는 영향이 다소 감소되어 나타났다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 기둥재의 강성 저하가 IS에 미치는 영향으로 인해 접합부의 회전강성 저하의 영향이 낮게 나타난 현상이라 사료된다.

그리고 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조의 내부에 있는 경우 IS가 다소 높게 나타났다.

2) 축력의 영향

축력이 증가하면 IS는 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 그 영향은 다른 구조적 변수들에 비해 크지 않은 것으로 나타났다.

다만 골조의 강성이 현저히 낮은 경우(기둥재 강성저하, 접합부 강성 저하)에는 그 효과가 다소 증가하는 것으로 판단된다.

3) 최하층 기둥부재 강성의 영향

최하층 기둥재의 강성 저하는 IS 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 골조의 형상비가 클수록 이러한 기둥재 강성 변화가 IS에 미치는 영향은 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 최하층 기둥재의 강성 변화는 골조의 IS 변화에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

4) 층간 기둥강성 변화의 영향

골조의 동일 스펠내에서의 기둥재 강성 변화는 전체 골조의 IS값 변화에는 그리 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.2.4 비탄성 지수 (IDX)

1) 접합부 회전강성의 영향

각 변수별 반강접합시 IDX와 강접합시 IDX의 비를 그림

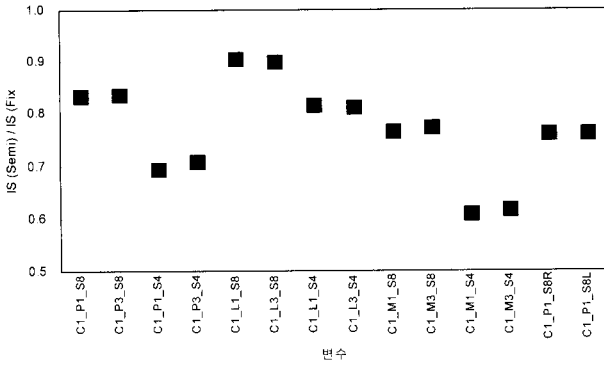


그림 14. 3층 1스팬 골조 반강접합시 IS와 강접합시 IS 비

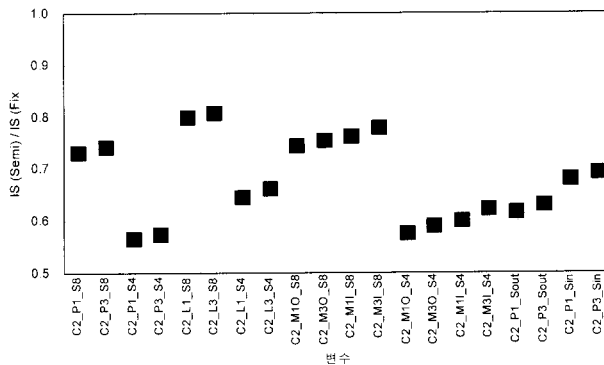


그림 15. 5층 3스팬 골조 반강접합시 IS와 강접합시 IS 비

2) 축력의 영향

표 2의 결과를 보면 축력이 증가하면  $D_{max}$ 는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 축력이 증가하게 되면 P- $\Delta$ 효과 등으로 인하여 수평변위가 골조의 붕괴기구에 미치는 영향이 커지게 되고 따라서 골조가 충분한 변형을 하기 전에 일찍 붕괴기구에 도달하게 된다. 이러한 영향으로 인하여 축력 증가시  $D_{max}$ 가 감소하는 것으로 사료되며, 이러한 축력의 영향은 골조의 설계시 충분히 고려되어야 할 것으로 사료된다.

3) 최하층 기둥부재 강성의 영향

최하층 기둥재의 강성의 영향은 골조 전체에 가력되는 축력값에 따라서 그 경향이 달리 나타나고 있다.

표 2의 결과에서 보면 비교적 골조에 가력되는 축력값이 작은 소규모 구조물(3층 1스팬 골조)의 경우에는 기둥재 강성이 낮을수록  $D_{max}$ 가 크게 나타난다. 하지만 축력의 절대값이 비교적 큰 구조물(5층 3스팬 골조)의 경우에는 기둥재 강성이 낮을수록  $D_{max}$ 값이 감소하는 것으로 나타났다.

이는 앞에서 언급한 바와 같이 골조의 강성과 P- $\Delta$ 효과 그리고 이로 인한 붕괴기구 형성에 의한 영향이라 판단된다. 즉 축력이 낮은 경우에는 P- $\Delta$ 효과와 같은 불안정 현상의 영향이 작으므로 기둥재 강성이 낮아 골조 전체의 강성이 낮은 경우 수평변위가 크게 일어날 수 있다. 하지만 축력이 높아 P- $\Delta$ 효

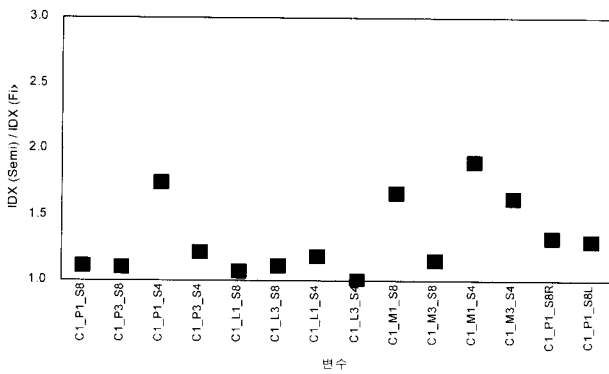


그림 16. 3층 1스팬 골조 반강접합시 IDX와 강접합시 IDX 비

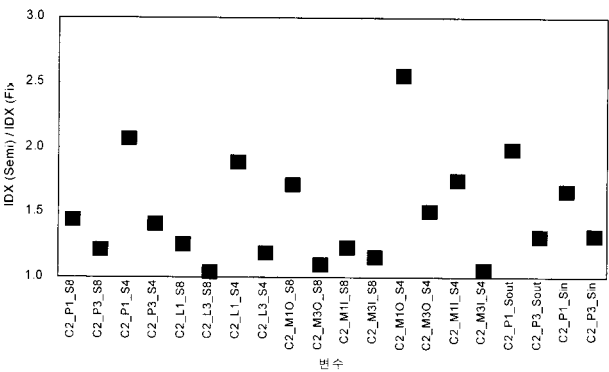


그림 17. 5층 3스팬 골조 반강접합시 IDX와 강접합시 IDX 비

16과 17에 나타내었다.

본 연구에 적용된 비탄성 지수는 그림 9에 나타난 것과 같이  $D_{max}$ 와 탄성 강성을 가정한 최대수평하중시의 변위 ( $D_{elastic}$ )의 비를 나타낸 것으로  $H_{max}$ 시 골조의 거동에 비탄성 거동이 차지하는 비율을 나타낸다.

표 2와 그림 16, 그림 17의 결과를 보면 전반적으로 접합부 회전강성이 낮을수록 IDX가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 접합부의 회전강성이 감소하고 이로 인하여 접합부 자체의 비탄성 변형이 증가하게 됨으로 발생한 현상으로 사료되며, 지진하중과 같이 극한의 하중조건일 경우 충분한 소성 변형을 유도할 수 있다는 측면에서 설계시 충분히 고려되어야 할 것으로 사료된다.

그리고 그림 17을 보면 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조의 내부에 있는 경우 축력이 낮으면(P1 series) 반강접합부가 외부에 있는 경우에 비해 IDX가 낮게 나타나나 축력이 증가할수록 상황이 역전되는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 설명한 것처럼, 골조의 강성과 붕괴기구의 관계에 의해 나타난 현상이라 사료된다.

2) 축력의 영향

축력이 증가하면 IDX는 감소하는 것으로 나타났다. 이렇

게 비탄성 지수가 감소했다는 것은 구조물이 최대하중에 도달하기 전에 충분한 소성변형을 하지 못했다는 의미이므로 축력의 증가는 P-Δ효과와 같은 불안정 현상을 초래하여 급격한 붕괴기구 형성을 유발할 수 있는 것으로 판단된다.

그러나 구조물의 형상비가 큰 경우에는 그 영향이 그리 크지 않았다. 이는 형상비가 큰 골조의 경우 축력의 영향 이전에 이미 골조의 강성 저하로 인하여 충분한 비탄성 변형을 할 수 없기 때문으로 사료된다.

3) 최하층 기둥부재 강성의 영향

최하층 기둥재의 강성 저하는 IDX의 감소를 가져오는 것으로 나타났다. 물론 기둥재의 강성이 저하되면 골조가 전반적으로 유연해지지만 골조의 붕괴가 급격하게 일어나게 되므로 최대내력 도달 이전에 충분한 소성 변형을 하지 못하는 것으로 판단된다.

따라서 축력과 함께 기둥재의 강성 감소는 골조의 붕괴기구 형성에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4) 층간 기둥강성 변화의 영향

기둥 강성이 골조의 동일 스펠내에서 변화하는 경우 외부에 강성이 낮은 기둥재가 위치하면 비탄성 지수가 감소하나 내부에 강성이 낮은 기둥이 위치할 경우에는 그 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

따라서 골조의 충분한 소성변형을 유도하기 위해서는 구조 설계시 외부보다는 내부에 강성이 낮은 기둥재를 위치하는 것이 유리하리라 판단된다.

3.2.5 수평하중 감소율(LDR)

1) 접합부 회전강성의 영향

각 변수별 반강접합시 LDR과 강접합시 LDR의 비를 그림 18과 19에 나타내었다.

표 2와 그림 18, 그림 19의 결과에서 보면 형상비가 큰 골조의 경우 접합부 회전강성이 LDR에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 사료된다. 하지만 형상비가 작은 경우에는 그 영향이 증가하는 것으로 나타났다.

이는 최대내력 도달 이후의 거동에 경우 이미 부재 단부에 소성힌지 등의 발생으로 인하여 골조의 붕괴기구가 형성되어 가고 있으므로 형상비가 커 세장한 골조의 경우에는 접합부 회전 강성의 변화가 LDR에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 하지만 형상비가 낮은 경우에는 붕괴기구 형성시 접합부 회전강성의 기여도가 나타나는 것으로 판단된다.

그리고 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조의 내부에 있는 경우가 외부에 있는 경우에 비해 LDR면에서 다소 유리한 결과를 나타내었다.



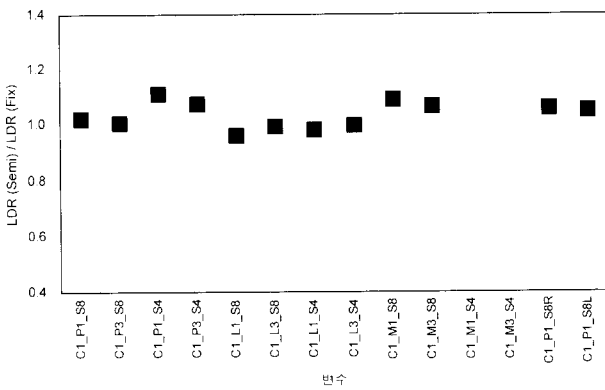


그림 18. 3층 1스팬 골조 반강접합시 LDR과 강접합시 LDR 비

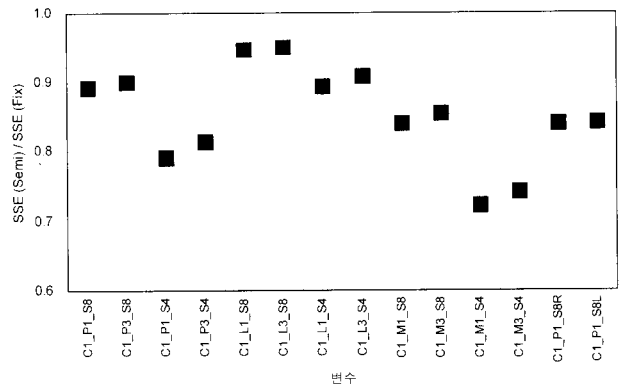


그림 20. 3층 1스팬 골조 반강접합시 SSE와 강접합시 SSE 비

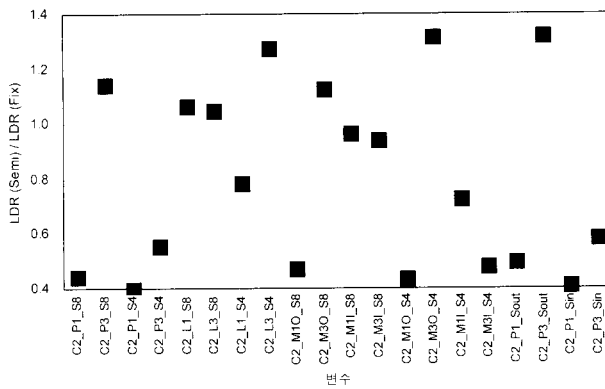


그림 19. 5층 3스팬 골조 반강접합시 LDR과 강접합시 LDR 비

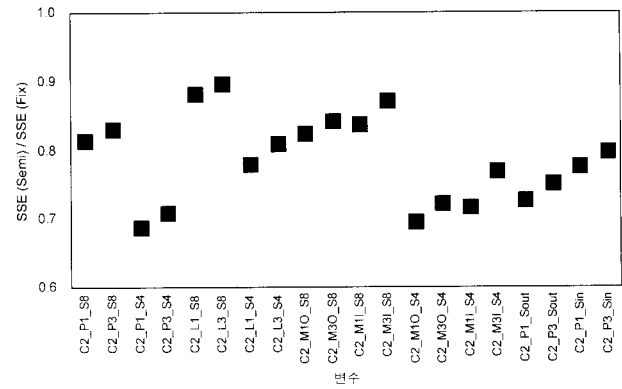


그림 21. 5층 3스팬 골조 반강접합시 SSE와 강접합시 SSE 비

## 2) 축력의 영향

축력이 증가하면 LDR은 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 최대내력 도달 이후 구조물의 안정성에 미치는 P-Δ효과를 보여주고 있다고 사료된다. 즉 최대내력 도달 이후 내력 감소시에는 수평변위값도 커지게 되고 구조물의 강성도 저하하게 되므로 축력이 클수록 P-Δ효과가 커지게 되고 이렇게 증가된 P-Δ효과는 골조의 내력저하를 급속하게 촉진시키는 것으로 사료된다.

## 3) 최하층 기둥부재 강성의 영향

최하층 기둥재의 강성 저하는 LDR을 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 기둥재의 강성저하는 골조 전체의 강성에 큰 영향을 미치게 되고 따라서 작은 수평하중에도 항복에 도달하게 된다. 이러한 외력 조건이 점진적 내력저하에 영향을 미친 것으로 판단된다.

## 4) 층간 기둥강성 변화의 영향

동일 층 내에서 기둥 강성의 변화는 축력이 커질수록 LDR에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 접합부 회전강성이 낮고 축력이 높은 경우 LDR의 변화에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

## 3.2.6 탄성 총강성(SSE)

### 1) 접합부 회전강성의 영향

각 변수별 반강접합시 SSE와 강접합시 SSE의 비를 그림 20과 21에 나타내었다.

표 2와 그림 20, 그림 21의 결과에서 접합부 회전강성이 감소할수록 SSE도 함께 감소하는 것으로 나타났다. 이는 총강성의 경우 골조의 수평강성을 대표한다고 볼 수 있는데 접합부 강성이 낮아지면 골조의 수평강성이 저하해 나타난 현상이라 사료된다.

그리고 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조의 내부에 있는 경우가 다소 SSE가 증가하는 것으로 판단된다.

### 2) 축력의 영향

축력의 변화는 SSE에 미치는 영향이 다른 변수들에 비해 매우 미미한 것으로 판단된다. 이는 SSE의 경우 골조의 강성이 일정하게 유지되는 탄성역에서는 하중에 관계없이 일정한 상수값을 가지므로 나타난 현상이라 사료된다.

### 3) 최하층 기둥부재 강성의 영향

최하층 기둥재의 강성 저하는 SSE를 급격하게 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 총강성이 1차적으로 골조의 부재 강

성에 의한 영향을 크게 받으므로 나타난 현상이라 사료되며, 특히 기동재의 강성 저하는 수평강성 저하에 큰 영향을 미치므로 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다.

4) 층간 기동강성 변화의 영향

동일 층 내에서도 기동 강성이 감소하게 되면 SSE는 감소하는 것으로 나타났다.

이 역시 부재 강성의 저하에 직접적으로 영향을 받게되는 층강성의 경우 부재 강성 저하의 영향이 나타나 발생한 현상으로 사료된다. 하지만 최하층 기동재 강성 저하의 영향에 비해서는 그 효과 크지 않은 것으로 판단된다.

그리고 동일 층 내에서 부재강성의 변화는 내외부에 관계없이 SSE의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

3.2.7 최대수평하중시 층강성(SSM)

1) 접합부 회전강성의 영향

표 2의 결과에서 접합부 회전강성이 감소할수록 골조의 SSM도 함께 감소하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 접합부 강성이 낮아지면 골조가 전체적으로 flexible 하게 되고 따라서 골조의 강성이 감소하여 나타난 현상이라 사료된다.

그리고 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조의 내부에 있는 경우와 외부에 있는 경우에 따른 차이는 다른 변수들에 비해 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

2) 축력의 영향

축력이 증가할수록 SSM도 증가하는 것으로 나타났다. 층강성의 경우 골조의 거동이 탄성범위에서는 일정한 상수값을 유지하지만 골조의 거동이 비탄성화 되면서 급격하게 감소하게 된다. 따라서 SSM값이 비교적 높은 값을 유지하고 있다는 것은 상대적으로 골조의 최대수평하중 도달시 비탄성 거동의 영향이 낮다는 의미가 된다.

따라서 이러한 경우 골조는 급격한 붕괴기구를 형성할 우려가 있으며, 나아가 충분한 변형을 하지 못하게 된다. 그러므로 축력의 증가에 따른 SSM의 증가는 골조의 에너지 소산 능력 측면에서는 매우 불리한 요소라 사료되며, 이는 선행된 결과 분석의 결론들과도 일치한다.

3) 최하층 기동부재 강성의 영향

최하층 기동재의 강성 저하는 SSM값을 급격하게 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 층강성이 1차적으로 골조의 부재 강성에 의한 영향을 크게 받으므로 나타난 현상이라 사료되며, 특히 기동재의 강성 저하는 골조 전체의 수평강성 저하에 큰 영향을 미치므로 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다.

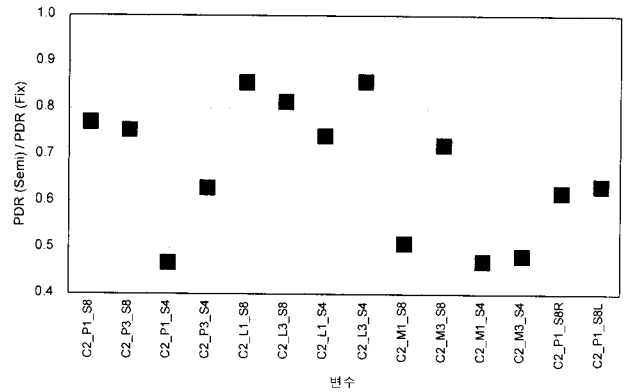


그림 22. 3층 1스팬 골조 반강접합시 PDR과 강접합시 PDR 비

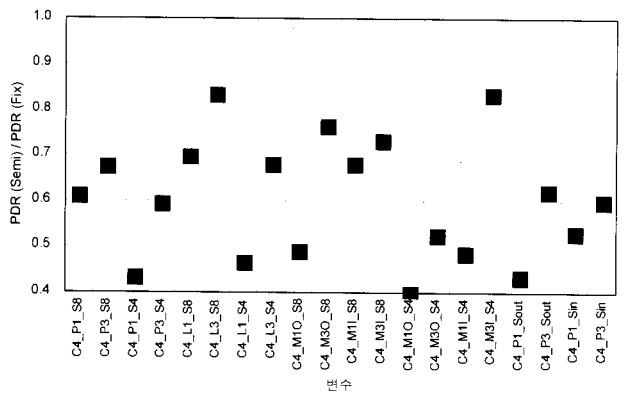


그림 23. 5층 3스팬 골조 반강접합시 PDR과 강접합시 PDR 비

4) 층간 기동강성 변화의 영향

골조의 강성이 저하되면 SSM은 감소하는 것으로 나타났다. 이 역시 부재 강성의 저하에 직접적으로 영향을 받게 되는 층강성의 경우 부재 강성 저하의 영향이 나타나 발생한 현상으로 사료된다. 하지만 최하층 기동재 강성 저하의 영향에 비해서는 그 효과 크지 않은 것으로 판단된다. 그리고 동일 층 내에서 부재강성의 변화도 골조의 강성에 미치는 영향에 따라서 상기의 결과와 그 영향이 거의 유사한 것으로 판단된다.

3.2.8 P-Δ 모멘트 비(PDR)

1) 접합부 회전강성의 영향

각 변수별 반강접합시 PDR과 강접합시 PDR의 비를 그림 22와 그림 23에 나타내었다.

표 2와 그림 22, 그림 23의 결과에서 접합부 회전강성이 감소할수록 PDR은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 접합부 강성이 낮아지면 골조가 전체적으로 flexible 하게 되고 따라서 변형이 증가하게 되므로 P-Δ 효과에 의한 2차 모멘트가 골조의 거동에 미치는 영향이 증

가하여 나타난 현상으로 사료된다.

그리고 회전강성이 낮은 반강접합부가 골조의 내부에 있는 경우와 외부에 있는 경우에 따른 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

#### 2) 축력의 영향

축력이 증가할수록 PDR은 감소하는 것으로 나타났다. FDR이 감소한다는 것은 구조물의 거동에 관여하는 모멘트의 비율 중 P-Δ효과에 의한 모멘트의 비중이 증가한다는 것이므로 축력과 수평하중의 영향을 직접적으로 받게 되는 P-Δ 모멘트의 경우 축력이 증가하면 그 영향이 커지는 것으로 사료된다.

#### 3) 최하층 기둥부재 강성의 영향

최하층 기둥재의 강성 저하는 PDR을 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 골조의 부재 강성 저하는 수평변위의 증가를 가져오게 되고, 특히 기둥재의 강성 저하는 골조 전체의 수평강성 저하에 큰 영향을 미치므로 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다.

#### 4) 층간 기둥강성 변화의 영향

동일 층에서 기둥재의 강성 변화는 PDR에 그리 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

### 4. 결론

수행된 접합부 비선형 거동을 고려한 강구조 비가새 골조의 안정성에 관한 해석적 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 접합부 회전강성 저하는  $H_{max}$ ,  $D_{max}$ , IS, SSE, PDR을 감소시키며, IDX를 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 접합부 회전강성이 저하되면 비가새 골조의 수평강성은 함께 저하되며 비탄성 거동 및 P-Δ효과는 증가하는 것으로 판단된다.
- (2) 최대내력 이후 거동에 있어 접합부 회전강성의 영향은 골조 형상비에 따라 달라지며, 형상비가 큰 세장한 골조일수록 접합부 회전강성 변화가 최대내력 이후 골조 거동에 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 접합부 회전강성 이외에도 기둥재 강성, 축력등이 골조의 안정성에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며, 골조의 안정성에 미치는 이들의 영향이 증가할 경우 접합부 회전강성 변화의 영향은 다소 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 회전강성이 낮은 접합부가 골조의 외부 보다는 내부에 위치하는 것이 골조의 수평강성 확보에는 유리한 것으로

로 나타났다.

### 감사의 글

이 논문은 2003년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (M01-2003-000-10172-0)

### 참고 문헌

- 김희동, 이명재, 박상철 (2001), 보강복형 비가새 골조의 P-Δ 영향에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집
- 김희동, 이명재 (2003), P-Δ효과를 고려한 기둥방향형 강구조 골조의 안정성, 한국강구조학회 논문집
- 김희동, 이명재 (2004), 저층형 강구조 비가새 골조의 안정성에 관한 해석적 연구, 대한건축학회 논문집 구조계 AISC(1999), Load and resistance factor design specification, AISC
- Chen W. F.(2000), Structural stability : from theory to practice, Engineering Structures 22
- Chen W. F., Chan S. L.(1995), Second-order inelastic analysis of steel frames using element with midspan and end spring, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 3, March
- E. M. Lui, W. F. Chen (1991), Stability design of steel frames, CRC press
- H. D. Kim, M. J. Lee (2002), The Influence of P-Δ Effects on the Behavior of Unbraced Frames, ISSS '02
- H. D. Kim, M. J. Lee (2005), The stability of unbraced frame with semi-rigid connections centering on P-Δ effect, ISSS '05
- Richard Liew J. Y., White D. W., Chen W. F.(1993), Second-order refined plastic hinge analysis for frame design. part 1, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 11, November
- T. V. Galambos(1998), Guide to stability design criteria for metal structures, Fifth edition, John wiley & Sons, Inc.

(접수일자 : 2005. 5. 11 / 심사일 2005. 5. 23 / 심사완료일 2005. 6. 29)