

거셋플레이트 연결부가 가새골조의 내진 성능에 미치는 영향

Influence of Gusset Plate Connection on Seismic Performance of Braced Frame

정 아 연*
Jung, A-Yeon

유 정 한**
Yoo, Jung-Han

Abstract

The purpose of this paper is to improve the inappropriate analysis results when the end of the brace on braced frame is applied as pinned connection in practice. The stiffness of the gusset plate connection on the braced frame has the amount of between pinned and rigid connection, and the analysis model that applies the stiffness of the connection must be used for accurate performance evaluation. In this study, the stiffness of the gusset plate designed by the balanced design procedure are quantified, and applied to the analysis model to simulate the gusset plate connection. The proposed model was verified through nonlinear static analysis (pushover analysis) of SAP2000. The effect of the connection on the seismic performance of the braced frame was analyzed by comparing the proposed model and pinned model. As a result, it was confirmed that the performance of the braced frame was evaluated conservatively in practice, and the ductility was overestimated. Therefore, it is important to consider the connection for accurate and economical performance evaluation.

Keywords : Gusset plate, Stiffness, Braced frame, SAP2000, Nonlinear static analysis, Seismic performance

1. 서론

1.1 연구의 목적

가새골조는 높은 안정성을 가진 경제적인 시스템으로 내진 성능을 향상시키기 위해 사용되는 강성 및 강도 보강형 내진 보강 시스템이다. 일반적으로 가새는 거셋플레이트를 통해 연결되며, 반복하중에 의해 압축 좌굴 및 인장 항복으로 지진에너지를 소산한다. 단일 판 거셋플레이트가 면외로 좌굴하는 경우에는 가새 부재의 단부 회전에 의해 거셋플레이트의 약축 휨을 유발한다¹⁾.

거셋플레이트 연결부는 핀절점과 강절점 사이의 강성을 가진다. 그러나 실무에서는 접합부 상세 모델링의 복잡성 때문에 핀접합으로 대체하며, 이는 부적절한 해석

결과를 초래한다. 가새골조의 성능은 골조 부재, 가새, 연결부 모두에 달려있으므로 정확한 성능평가를 위해 간단하게 거셋플레이트 연결부를 구현할 수 있는 해석 모델이 필요하다.

본 논문에서는 제안된 강성 식²⁾을 이용하여 거셋플레이트 연결부의 강성을 정량화하였으며, SAP2000을 통해 연결부의 비선형 회전 스프링 모델³⁾을 도입한 해석 모델을 검증하였다. 또한 압축력을 받는 대각 가새골조의 비선형 정적해석을 수행하였으며, 제안된 모델과 기존의 핀접합 모델의 성능을 비교하여 거셋플레이트 연결부가 가새골조의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

1.2 연구 동향

특수중심가새골조의 내진 성능은 지진 변형 요구의 직접적인 고려를 통한 거셋플레이트 연결부의 설계와 연결부의 항복을 허용함으로써 개선할 수 있다는 선행 연구 결과에 따라 Yoo, Lehman & Roeder(2008a)는 유한요소해석을 통한 매개변수 연구를 수행하였다⁴⁾.

Lehman et al.(2008)과 Roeder, Lumpkin & Lehman(2011)은 현행 설계기준에 의해 설계된 특수중

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 석사과정
Department of Architecture, Seoul National Univ. of Science and Technology
** 교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul National Univ. of Science and Technology
Tel: 02-970-9015 Fax: 02-974-1480
E-mail: happyjh@seoultech.ac.kr

심가새골조의 거셋플레이트가 비경제적으로 설계될 수 있음을 지적하였다. 또한 가변적인 내진성능, 의도하지 않은 파괴모드, 제한된 변형 능력의 우려가 있다는 선행 연구 결과에 따라 새로운 균형설계절차(Balanced Design Procedure, BDP)를 개발하였다^{5),6)}.

Hsiao, Lehman & Roeder(2012)는 정확하고 실용적인 계산 모델로써 거셋플레이트 연결부에 대한 비선형 해석 모델을 개발하였다. 제안된 모델은 핀접합 또는 강접합을 사용한 기존의 방식들과 비교된다. 총 소산 에너지의 오차는 제안된 해석 모델 13%, 핀접합 모델 42%, 강접합 모델 20%로 제안된 모델을 사용했을 때 가새의 압축 거동 및 좌굴 후 변형을 더 정확하게 예측할 수 있다는 연구 결과를 제시하였다. 따라서 골조의 정확한 거동을 예측하기 위하여 가새의 정확한 모델링 접근뿐만 아니라 연결부에 대한 정확한 접근이 필요함을 강조하였다³⁾.

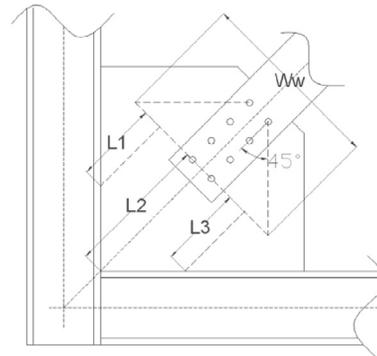
Du, Liu & Chan(2019)은 간단하면서도 정확한 해석 모델을 제안하여 특수중심가새골조의 복잡한 거동을 구현하였다. 제안된 모델은 부재당 하나의 요소만 사용하여 모델링하였으며, 새로운 하이브리드 유연성 기반의 보-기둥 요소로 초기 결함과 잔류응력을 고려하였다. 또한 가새 단부에 스프링을 도입하여 거셋플레이트 연결부의 반강접 거동을 나타내었다. 그 결과, 제안된 모델은 해석 효율성 향상과 더불어 정확한 해석 결과를 제공하였다⁷⁾.

과거에는 매개변수 연구를 통한 해석 모델의 확대, 거셋플레이트 모델링 기법에 대한 해석 검증을 중심으로 연구가 진행되었다. 최근에는 구조물의 내진성능평가에 대한 국내외 관심과 수요가 급증하고 있다. 본 연구에서는 정확하고 경제적인 내진성능평가의 중요성에 따라 선행 연구에서 최소한의 모델링 기법만을 참조하여 합리적으로 실무에 적용될 수 있는 단순한 모델에 초점을 맞추었다. 이에 구조물의 구체적인 성능 비교를 통해 거셋플레이트 연결부를 도입한 가새골조의 내진성능평가에 대한 기초 연구로써 활용되고자 하였다.

1.3 거셋플레이트 관련 이론

1.3.1 회전 강성 모델²⁾

거셋플레이트 연결부의 회전 강성을 정량화하기 위해



〈Fig. 1〉 Proposed model for rotational stiffness of connection²⁾

단순화 된 모델을 적용하였으며, 이는 〈Fig. 1〉과 같다. 회전 강성은 식 (1)로 계산된다.

$$K_{Rotational:cal} = \frac{E}{L_{ave}} \left(\frac{W_w t^3}{12} \right) \quad (1)$$

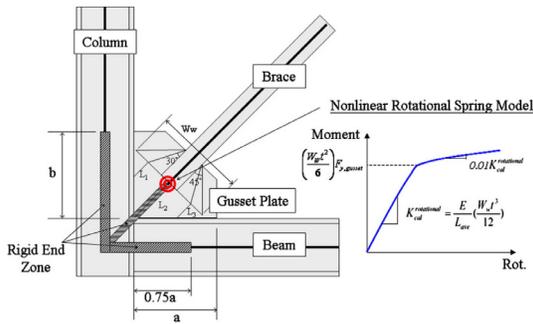
〈Fig. 1〉에서 E 는 탄성계수, W_w 는 Whitmore 유효 폭, L_{ave} 는 평균 유효좌굴길이, t 는 거셋플레이트의 두께이다. 제안된 모델 및 식 (1)은 정확하고 신뢰성 있는 연결부의 회전 강성을 제공한다.

1.3.2 거셋플레이트 연결부 구현 모델³⁾

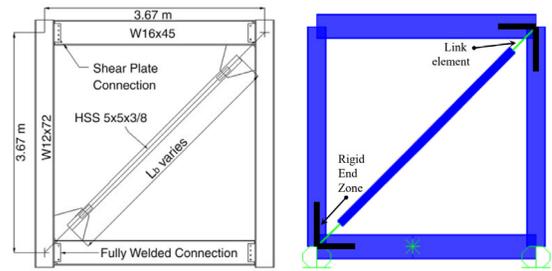
거셋플레이트 연결부를 구현하기 위해 강체영역(Rigid end zone) 및 비선형 회전 스프링을 도입하여야 한다. 강체영역(Rigid end zone)은 거셋플레이트 연결부를 설치한 영역을 나타내기 위해 도입되어야 한다. 실험으로 확인된 결과에 의하면 거셋플레이트는 대각 응력으로 인해 일부 면내에만 변형이 발생하기 때문에 강체 영역(Rigid end zone)은 전체 거셋플레이트의 크기보다 약간 작다. 따라서 〈Fig. 2〉와 같이 보의 강체영역은 실제 거셋플레이트 가로 길이의 75%만 할당한다.

거셋플레이트 연결부의 비선형 면외 회전 거동을 시뮬레이션하기 위하여 제안된 회전 스프링 모델은 〈Fig. 2〉와 같다. 탄성 구간에서의 회전 강성은 식 (1)을 따르며, 항복 후 강성은 초기 회전 강성의 1%이다. 회전 스프링 모델의 회전 모멘트는 식 (2)로 계산된다.

$$M_y = \left(\frac{W_w t^2}{6} \right) F_{y,gusset} \quad (2)$$



〈Fig. 2〉 Illustration of the proposed connection model³⁾



(a) Geometric shape of specimen⁴⁾ (b) Proposed model of SAP2000

〈Fig. 3〉 Overview of HSS5 specimen

2. 모델링 검증

2.1 SAP2000 해석 모델

워싱턴대학교(UW)에서 수행한 HSS5 실험체⁶⁾ 및 대만의 국립지진공학연구센터(NCREE)에서 수행한 TCBF2-1 실험체⁹⁾에 대하여 SAP2000¹⁰⁾을 이용하여 비선형 정적해석을 수행하였다. 제안된 모델은 1.3.2절의 거셋플레이트 연결부 구현 모델을 도입하였으며, 핀접합 모델은 이를 도입하지 않고 가새 단부에만 핀접합으로 모델링하였다. 이를 제외한 모든 조건은 제안된 모델과 핀접합 모델이 동일하다. 제안된 모델과 핀접합 모델의 성능을 비교하여 제안된 모델의 정확성을 평가하고자 하였다.

2.1.1 HSS5의 제안된 모델

HSS5 실험체의 기하학적 형상은 〈Fig. 3 (a)〉⁴⁾에 나타내었으며, SAP2000을 이용하여 생성한 모델은 〈Fig. 3 (b)〉와 같다. 해석 모델은 Yoo, Roeder & Lehman(2008b)¹¹⁾의 유한요소해석에 사용된 경계 조건, 재료 물성과 더불어 Hsiao, Lehman & Roeder(2012)³⁾의 모델링 기법을 참조하였다. 사용된 부재의 규격과 재료 물성은 〈Table 1〉에 정리하였다.

제안된 모델의 보, 기둥, 가새의 소성인지는 FEMA 356¹²⁾의 Steel 비선형 힌지 속성을 사용하여 보와 기둥은 양단부에, 가새는 정중앙에 입력하였다. 제안된 모델에서 초기 변형이 발생한 방향으로 가새의 면외 좌굴을 유도하기 위하여 초기 결함은 L/1000(L=가새 순길이)로 모델링하였다. 또한 강제영역(Rigid end zone)을 포함시키기 위해 보, 기둥의 단부를 End length offsets 기능으로 모델링하였다.

HSS5 실험체에 사용된 거셋플레이트의 회전 강성은 식 (1)을 통해 도출하였으며, 그 값을 〈Table 2〉에 나타내었다. 또한 거셋플레이트의 적절한 비선형 면외 회전 거동을 시뮬레이션하기 위하여 Link element를 사용하였다. 연결부의 길이와 중량을 입력하고, 보-기둥의 절점과 가새 단부 사이를 다중 선형 탄성요소(Multi-linear elastic element) 유형으로 설정하였다. 면내 회전 방향은 구속시켰으며, 면외 방향으로는 〈Fig. 2〉의 비선형 회전 스프링 모델 그래프에 따라 모멘트-회전각 특성을 부여하였다.

2.1.2 TCBF2-1의 제안된 모델

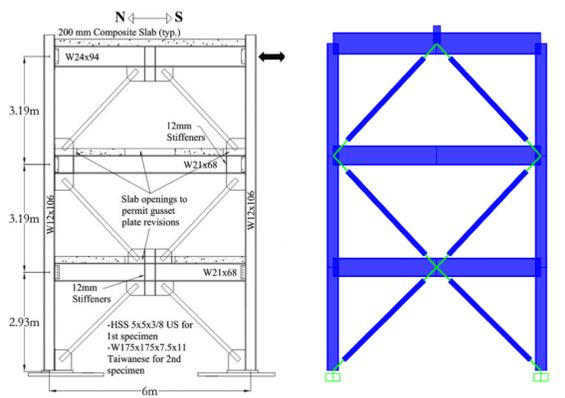
TCBF2-1 실험체의 기하학적 형상은 〈Fig. 4 (a)〉⁹⁾에 나타내었으며, SAP2000을 이용하여 생성한 모델은 〈Fig. 4 (b)〉와 같다. 사용된 부재의 규격과 물성치는

〈Table 1〉 Section and yield strength of test specimen

	Beam		Column		Brace	
	Section	F_y (MPa)	Section	F_y (MPa)	Section	F_y (MPa)
HSS5	W16 X45	395.1	W12 X72	408.9	HSS 5 X5 X3/8	504.7
TCBF2-1	W21 X68 (1-2F)	428.8	W12x X06	398.5	HSS 5 X5 X3/8	317.2
	W24 X94 (3F)					

〈Table 2〉 Rotational stiffness of test specimen connection

	Size (mm)	t_p (mm)	W_W (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_{ave} or L_2 (mm)	K_{rot} (kN·m)
HSS5	635 X 533	9.5	655.6	82.2	293.7	13.9	130.0	75.7
TCBF2-1	556 X 498	9.5	624.8	102.0	244.4	Negative number	244.4	38.4



(a) Geometric shape of specimen⁹⁾ (b) Proposed model of SAP2000

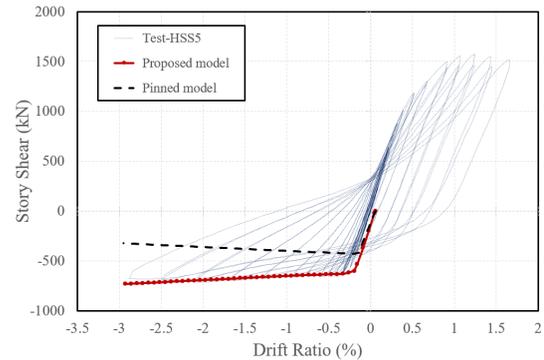
〈Fig. 4〉 Overview of TCBF2-1 specimen

〈Table 1〉에 정리하였다. TCBF2-1 실험체에 사용된 거셋플레이트의 회전 강성은 식 (1)을 통해 도출하였으며, 그 값을 〈Table 2〉에 나타내었다. 제안된 모델의 거셋플레이트 모델링 방식은 HSS5 실험체와 동일하다. 추가로 합성슬래브의 영향을 고려하기 위해 각 층에 Diaphragm constraint의 z-constraint 속성을 부여하였으며, 같은 방식으로 보의 면의 방향으로도 구속하였다.

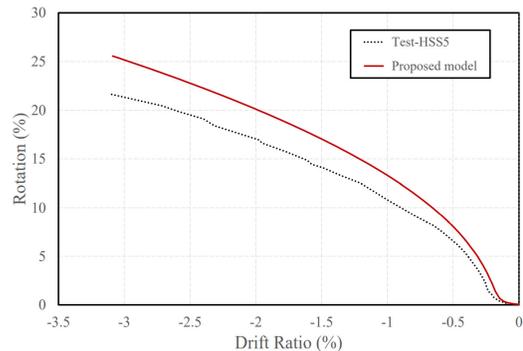
2.2 비선형 정적해석

2.2.1 HSS5 실험체 해석 결과

제안된 모델의 신뢰성을 입증하기 위하여 비선형 정적해석을 수행하였다. 정적해석의 특성상 인장 가새의 압축 좌굴을 반영하지 못하는 한계로 인하여 가새가 압축력을 받는 방향으로 변위를 주도하여 해석을 진행하였다. 〈Fig. 5〉에 실제 실험 결과와 함께 제안된 모델 및 핀점합 모델의 해석 결과를 비교하였다. 그 결과, 최대 밀면전단력을 기준으로 제안된 모델에서 2.5%, 핀점합 모델에서 40.5%의 오차가 발생하였다. 핀점합 모델에



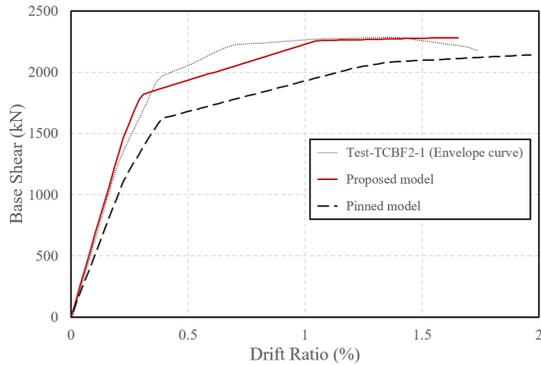
〈Fig. 5〉 Comparison of HSS5 test result and analysis result



〈Fig. 6〉 Comparison of SW gusset plate rotation

비해 제안된 모델이 실제 실험체의 성능과 유사하다고 볼 수 있으며, 이를 통해 해석 모델의 신뢰성을 확보하였다.

제안된 모델의 가새 단부에서 Link element 거동과 HSS5 연결부의 실험 결과를 비교하기 위해 남서쪽(SW) 거셋플레이트에 대한 면의 방향으로의 층간변위비-회전 각 그래프를 〈Fig. 6〉에 나타내었다. 가새가 압축력을 받으면 거셋플레이트 연결부가 면의 방향으로 좌굴하기에 면의 방향으로 입력한 회전 스프링 모델이 압축 측에 영향을 미친 것으로 보아 연결부를 올바르게 모델링한 것으로 판단된다. 그러나 제안된 모델의 연결부는 실험체에 비해 회전각을 과대평가 하는 경향을 보였으나, 회



〈Fig. 7〉 Comparison of TCBF2-1 test result and analysis result

전각은 전체 구조물의 국부적인 영역인 것을 고려하면 실험 결과와 유사한 추세선을 보인다고 판단하였다.

2.2.2 TCBF2-1 실험체 해석 결과

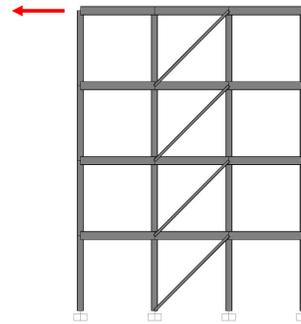
〈Fig. 7〉에 TCBF2-1 실험체의 포락 곡선과 제안된 모델 및 핀점합 모델의 비선형 정적해석 결과를 비교하였다. 최대 밀면전단력을 기준으로 제안된 모델은 0.6%, 핀점합 모델은 6.7%의 오차가 발생하였으며, HSS5 실험체에 비해 오차가 현저히 줄어든 것을 확인하였다. TCBF2-1 실험체는 인장 및 압축력의 영향을 동시에 받는 X형 가새골조이기에 압축력의 영향만 받은 대각 가새골조에 비해 연결부의 영향이 적게 미친 것으로 판단된다. 전체적으로 성능을 과소평가하는 핀점합 모델에 비해 제안된 모델은 실험체와 유사한 강도 및 강성을 가지며 더 높은 정확도를 나타내는 것을 확인하였다.

3. 2차원 구조해석

SAP2000을 이용하여 대상 건물의 한 면을 모델링 하고 비선형 정적해석을 수행하였다. 가새의 압축 좌굴을 반영하기 위해 〈Fig. 8〉과 같이 가새가 압축력을 받는 방향으로 변위를 주도하여 해석을 진행하였다. 제안된 모델과 핀점합 모델의 성능을 비교하여 가새골조의 거셋플레이트 연결부가 건물 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

3.1 모델링 개요

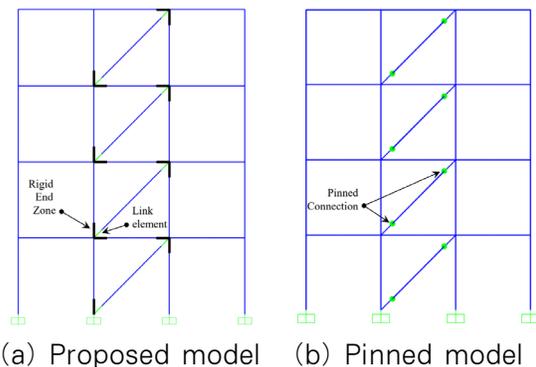
대상 건물의 한 면은 앞서 검증한 HSS5 실험체로 쌓



〈Fig. 8〉 Overview of Pushover analysis

아올린 층 높이 3.658m의 3경간 4층 골조이다. 사용된 부재 단면과 물성치는 〈Table 1〉의 HSS5와 같다. 제안된 모델은 앞서 검증된 모델링 방법과 동일하며 강제영역(Rigid end zone) 및 Link element를 도입하여 거셋플레이트 연결부를 구현하였다. 거셋플레이트의 강성 산정 과정, 비선형 회전 스프링 모델은 앞서 검증한 HSS5 실험체와 동일하다.

앞서 모델링을 검증한 바와 같이 거셋플레이트 연결부를 구현하기 위해서는 강제영역(Rigid end zone) 및 비선형 회전 스프링 요소를 모두 도입하여야 한다. 각 변수들이 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 강제영역(Rigid end zone)만 모델링한 Rigid model과 비선형 회전 스프링 요소만 모델링한 Link model을 추가하였다. 제안된 모델은 강제영역과 비선형 회전 스프링 요소를 모두 모델링하였으며, 핀점합 모델은 가새 단부만 핀점합으로 모델링하였다. 제안된 모델과 핀점합 모델은 〈Fig. 9〉에 나타내었으며, 각 모델들의 해석 변수는 〈Table 3〉에 정리하였다.



〈Fig. 9〉 SAP2000 model of target building

〈Table 3〉 Variables of analysis model

	Rigid end zone	Link element	Pinned connection
Proposed model	○	○	X
Link model	X	○	X
Rigid model	○	X	○
Pinned model	X	X	○

3.2 비선형 정적해석

3.2.1 해석 결과

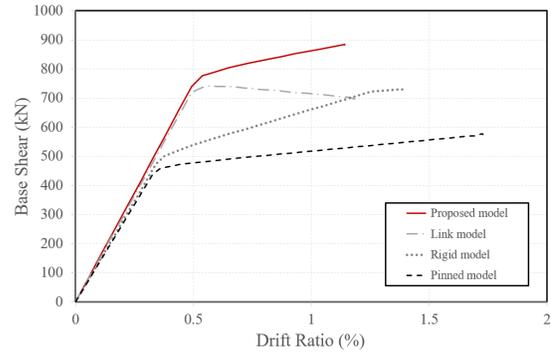
각 해석 모델의 비선형 정적해석 결과 값을 〈Table 4〉에 정리하였다. 〈Fig. 10〉에서 각 모델의 층간변위에 대한 밀면전단력 그래프를 비교하였다. 〈Fig. 11〉은 제안된 모델(100%) 대비 각 모델들의 탄성강성, 항복강도, 최대 밀면전단력 비를 나타낸 그래프이다. 강도를 기준으로 제안된 모델(100%), Link 모델(90.5%), Rigid 모델(73.4%), 핀접합 모델(62.3%) 순으로 강한 성능을 가지고 있음을 확인하였다. Rigid end zone의 도입은 구조물의 강도를 약간 증가시키는 효과가 있었으며, Link element는 구조물의 강성 및 강도를 크게 증가시키는데 영향을 미친 것을 확인하였다. 따라서 두 해석 변수 모두 거셋플레이트 연결부를 구현하기 위해 필요한 요소인 것으로 사료된다.

3.2.2 연성도

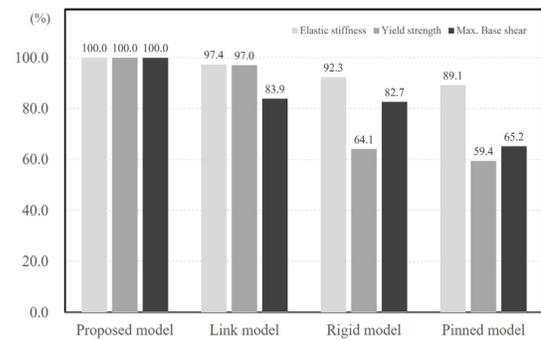
연성도는 항복 변위를 기준으로 건물이 파괴되지 않고 어느 정도의 최대 변위가 나타나는지의 지표이다. 값이 클수록 갑작스럽고 강한 하중에 버틸 수 있음을 의미한다. 연성도는 최대변위를 항복변위로 나누어 산정하였으며, 그 값을 〈Table 4〉 및 〈Fig. 12〉에 나타내었다. Link 및 Rigid 모델은 제안된 모델보다는 크고 핀접합 모델보다는 작은 연성 능력을 가진 것으로 산정되었다.

〈Table 4〉 Analysis result of 2D target building

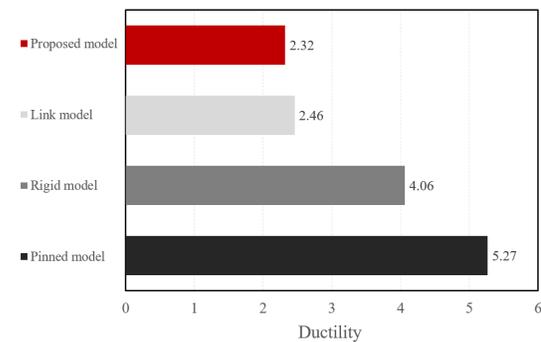
Analysis model	Elastic stiffness (kN·m)	Yield strength (kN)	Max. base shear (kN)	Ductility
Proposed model	10264.3	739.0	883.6	2.32
Link model	9996.7	717.0	741.6	2.46
Rigid model	9475.5	473.8	730.4	4.06
Pinned model	9150.1	439.2	576.2	5.27



〈Fig. 10〉 Comparison analysis result of analysis models



〈Fig. 11〉 Percentage of analysis results compared to proposed model



〈Fig. 12〉 Ductility of analysis models

핀접합 모델(2.27), Rigid 모델(1.75), Link 모델(1.06), 제안된 모델(1.00) 순으로 큰 연성 능력을 가지고 있음

을 확인하였다. 이는 현재 실무에서 가새골조의 연성 능력을 과대평가하고 있음을 의미한다.

3.2.3 제안된 모델과 핀접합 모델의 비교

제안된 모델 대비 핀접합 모델의 탄성강성, 항복강도, 항복변위, 최대 밀면전단력의 오차(%)를 <Fig. 13>에 나타내었다. 탄성 강성은 제안된 모델이 핀접합 모델에 비해 약 1.1배 크게 산정되었다. 항복 강도와 항복 변위는 각각 40.6%, 33.3%로 비교적 큰 차이를 보였다.

최대 밀면전단력은 지진이 발생했을 때 구조물이 더 효과적으로 저항할 수 있는 정도를 나타내는 지표이다. 두 모델의 최대 밀면전단력 차이는 34.8%이며, 핀접합 모델에 비해 1.5배 큰 밀면전단력에 해당한다. 따라서 본 대상 건물의 성능 평가 시 핀접합 모델을 사용하면 강도가 1.5~1.7배 정도 낮게 평가되며, 이는 현재 실무에서 가새골조가 실제로 보유한 저항력에 비해 보수적으로 평가되고 있음을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 가새골조에서 거셋플레이트 연결부 모델링 개선의 필요성에 따라 연결부의 강성을 정량화하였으며, 이를 해석 모델에 도입하였다. 또한 SAP2000을 통해 압축력을 받는 대각 가새골조의 비선형 정적해석을 수행하여 연결부가 내진 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

1) 선행 연구에서 실험한 HSS5 및 TCBF2-1 실험체를 바탕으로 제안된 모델을 검증하였다. 비선형 정적해석 결과, 제안된 모델이 핀접합 모델에 비해 실험체와 유사한 성능을 나타내는 것을 확인하였으며, 이를 통해

신뢰성을 입증하였다.

2) 대상 건물의 변수 해석 결과, 강제영역(Rigid end zone) 및 Link element 모두 거셋플레이트 연결부를 구현하기 위한 중요한 요소로 사료된다.

3) 대상 건물의 비교 결과, 실제 성능과 유사한 제안된 모델에 비해 핀접합 모델의 저항력은 1.5~1.7배 작고 연성능력은 2.3배 크게 산정되었다.

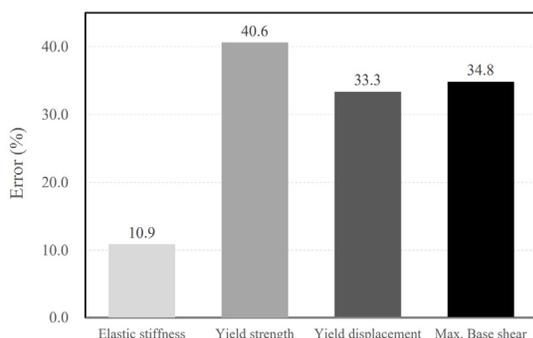
4) 현재 실무에서는 가새골조의 저항력을 보수적으로 평가하고 있으며, 연성 능력은 과대평가하고 있음을 확인하였다. 따라서 가새골조를 시뮬레이션 할 때 정확하고 경제적인 성능 평가를 위해 거셋플레이트 연결부의 영향을 고려한 정확한 모델을 사용하는 것이 중요하다.

이와 같이 거셋플레이트 연결부가 구조물의 성능에 미치는 영향이 확인되었다. 그러나 가새골조의 정확한 성능 평가를 위해 후속 연구에서 다음의 사항들이 고려되어야 한다.

(1) 실제 지진이 발생하면 가새는 인장력과 압축력을 동시에 번갈아 받으므로 정확한 성능평가를 위해 동적 해석을 수행하여야 한다.

(2) 균형설계절차(Balanced Design Procedure, BDP)에 따라 설계한 사각 거셋플레이트는 가새의 연결 각도가 작아질수록 연결부의 크기가 커질 우려가 있다. 따라서 조밀한 거셋플레이트를 설계할 수 있는 합리적인 방안이 필요하다.

(3) 가새는 연결된 각도가 작아질수록 성능을 더욱 발휘하므로 거셋플레이트 연결부가 구조물에 미치는 영향 또한 증가할 것으로 사료된다. 경간 및 층수를 늘린 구조물을 대상으로 연결부가 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.



<Fig. 13> Error of pinned model compared to proposed model

감사의 글

본 논문을 위한 2020년도 서울과학기술대학교의 지원에 감사드립니다.

References

1. Architectural Institute of Korea, "Korean Building Code and Commentary (KBC2016)", Kimoon dang, 2016.

2. Yoo, J. H., "Evaluation of Gusset Plate Connection Stiffness in Braced Frames", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.21, No.2, pp.105~113, 2009, Retrieved from <http://koreascience.kr/article/JAKO200910103422799.pdf>
 3. Hsiao, P. C., Lehman, D. E., & Roeder, C. W., "Improved analytical model for special concentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.73, pp.80~94, 2012, doi: 10.1016/j.jcsr.2012.01.010
 4. Yoo, J. H., Lehman, D. E., & Roeder, C. W., "Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.64, No.6, pp.607~623, 2008, doi: 10.1016/j.jcsr.2007.11.005
 5. Lehman, D. E., Roeder, C. W., Herman, D., Johnson, S., & Kotulka, B., "Improved Seismic Performance of Gusset Plate Connections", *Journal of Structural Engineering*, Vol.134, No.6, pp.890~901, 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:6(890)
 6. Roeder, C. W., Lumpkin, E. J., & Lehman, D. E., "A balanced design procedure for special concentrically braced frame connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.67, No.11, pp.1760~1772, 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2011.04.016
 7. Du, Z. L., Liu, Y. P., & Chan, S. L., "A practical analytical model for special concentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.155, pp.219~232, 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.12.027
 8. Johnson, S. M. (2005). Improved seismic performance of special concentrically braced frames (Doctoral dissertation). University of Washington, USA.
 9. Lumpkin, E. J., Hsiao, P. C., Roeder, C. W., Lehman, D. E., Tsai, C. Y., Wu, A. C., ... Tsai, K. C., "Investigation of the seismic response of three-story special concentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.77, pp.131~144, 2012, doi: 10.1016/j.jcsr.2012.04.003
 10. SAP2000, "SAP2000 Integrated software for structural analysis and design analysis Reference manual", Computers and Structures, Inc., 2002.
 11. Yoo, J. H., Roeder, C. W., & Lehman, D. E., "Analytical Performance Simulation of Special Concentrically Braced Frames", *Journal of Structural Engineering*, Vol.134, No.6, pp.881~889, 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:6(881)
 12. FEMA 356, "Prestandard and commentary on the seismic rehabilitation of building", Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997.
- Received : February 17, 2021
 - Revised : March 09, 2021
 - Accepted : March 09, 2021