

중심 가새 골조에 형성되는 연약층을 방지하기 위한 시스템의 내진 성능 평가

Seismic Performance Evaluation of System to Protect the Occurrence of Weak-Story With Braced Frame

김 다 영*
Kim, Da-Young

유 정 한**
Yoo, Jung-Han

Abstract

The purpose of the paper is to introduce a system that reduces the occurrence of weak-story in the event of earthquake. Weak-story concentrates deformation on the story and causes all member to collapse before the capacity of all member is reached. This paper introduces Strong-Back system (SB) to protect weak story. SB is a hybrid of zipper frame, tied eccentrically braced frame, and elastic truss system and it is divided into elastic and inelastic areas. Elastic areas prevent the generation of weak story by distributing energy, and inelastic areas dissipate energy through buckling or yielding. In this paper, the seismic performance is evaluated by comparing the four type braced frame with SB through push-over analysis. The four criteria are compared from the base shear, the ductility capacity, the column failure order, and the quantity of brace. As a result, SB proved to have sufficient performance to protect the weak-story.

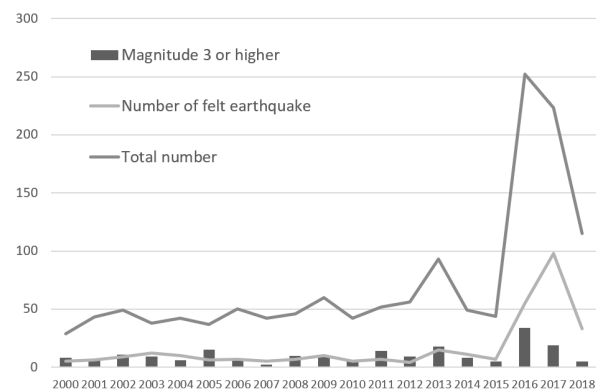
Keywords : Steel braced frame, Seismic performance, Weak-story, Push-over, KBC2016

1. 서론

우리나라는 일본에 비해 상대적으로 지진이 적게 발생하지만 최근 발생 빈도가 증가하고 있다.

<Fig. 1>은 2000~2018년 기상청의 자료를 토대로 한반도에서 일어난 지진을 규모 3 이상, 유감 지진 횟수, 지진 발생 총 횟수로 나누어 정리한 것이다. 이 중 높은 규모의 지진 5개는 2016년에 발생한 규모 5.8 경주 지진, 2017년 규모 5.4 포항 지진, 2016년 규모 5.1 경주 지진, 2014년 규모 5.1 충남 태안군 지진, 2016년 규모 5 울산 지진으로 나타났다. 이를 통해 지진 발생의 횟수가 점진적으로 증가하고 있으며, 규모 3 이상의 지진도 적지 않음을 알 수

있다. 이러한 현황은 한반도가 더이상 지진으로부터 안전하지 않으며 내진 성능을 갖춘 설계가 필요함을 뜻한다.



<Fig. 1> Korea earthquake from 2000 to 2018

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 석사과정
School of Architecture, Seoul National University of
Science and Technology

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

주로 강구조에서 사용되는 중심 가새 골조 (Centrically Braced Frames, CBF)는 가새의 축 강성과 축 강도를 활용하기 때문에 최소의 철골 물량으로 횡력에 대한 저항력을 확보할 수 있는 매우 효과적인 시스템이다. 그러나 탄성 거동을 전제로 풍하중에 대한 저항력을 증진하기 위해 개발되었기

때문에 비탄성 거동을 수반하는 지진 하중에 저항하기 위한 최선의 시스템이라고 하기 어렵다. 가새 골조는 지진 발생 시 에너지 소산 능력의 부족으로 반복 하중 시 가새 및 접합부의 파단 등이 문제로 대두되었다. California Seismic Safety Commission (1996)은 1994년 캘리포니아 Northridge에서 발생한 규모 7.7의 지진으로 인한 CBF 건물의 주요 붕괴 원인 중 하나가 연약층(Weak story) 발생임을 확인하였다¹⁻³⁾.

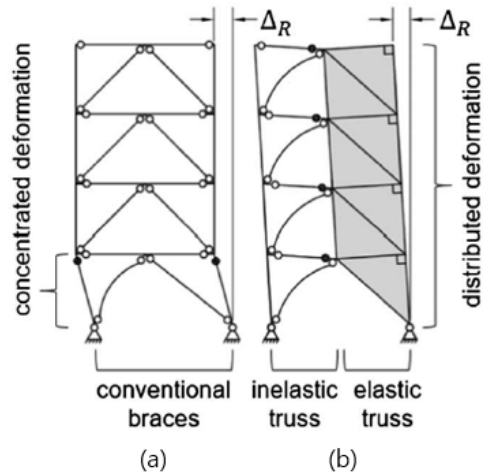
연약층은 최초의 좌굴이 발생한 특정 층에 변형이 집중되어 일어나는 현상으로 하중이 분산되지 못하고 변형된 층에 집중되면서 발생한다. 현재 이를 예방하기 위한 시스템으로 Dual system, Zipper braced frames 등이 사용되고 있다. Dual system은 기존의 횡-저항 Frame에 Moment를 저항하는 Back-up 시스템을 조합하여 각각의 단점을 극복한 것이지만 설계에 적용되는 강성과 강도를 정확하게 파악할 수 없다⁴⁾. Zipper braced frame은 아래층의 에너지를 위층으로 분배하여 에너지의 집중을 막는 시스템이지만 각 층에서 요구하는 적당한 부재 사이즈를 산정하기 어렵다는 단점이 있다⁵⁾.

본 연구에서는 이와 같은 단점을 보완하는 가새 골조 시스템으로 Strong-Back(이하 SB) 시스템을 소개하고, 건축구조설계기준(이하 KBC2016)으로 설계한 가새 골조와 SB의 내진 성능을 비선형 정적 해석(Push-over, 이하 푸쉬오버)을 통해 비교하고자 한다.

2. 선행 연구

SB 시스템은 Zipper frame, Tied eccentrically braced frame, Elastic truss system을 조합한 것으로 가새들이 교차하는 곳을 연결한 Tie가 주요 부분이다. Tie는 SB의 뼈대처럼 거동하여 연약층 생성을 예방하는데 중추적인 역할을 한다. SB는 탄성 영역과 비탄성 영역으로 분리된 것이 특징이다. 탄성 영역은 에너지를 분배하여 연약층 생성을 막고, 비탄성 영역은 좌굴 또는 항복을 통해서 에너지를 소산시키는 역할을 한다. 2개의 영역은 지진이 발생했을 때 각 영역을 오고가며 에너지를 분배 및 조절한다. <Fig. 2>와 같이 탄성 영역인 오른쪽에는 HSS 강재

를 사용하고, 비탄성 영역인 왼쪽은 BRB 또는 충분히 강성을 가진 부재를 사용하여 에너지 분배 능력을 향상시킨다^{6,7)}.



<Fig. 2> Comparison of braced frame drift: (a) Without SB concept; (b) With SB concept⁷⁾

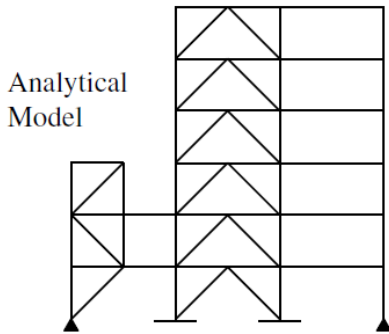
SB 시스템에 관한 주요 연구는 다음과 같다.

Lai & Mahin(2015)은 6층 건물에 사용되는 CBF 3개, SB 시스템 3개로 총 6개의 표본을 푸쉬오버와 Nonlinear dynamic response history analyses를 통해 비교하였다. 이를 통해 SB가 연약층 메커니즘에 효과적임을 확인하고, Tie 부재가 층 변형을 균등하게 분배하는데 중요한 역할을 하며 설계 간소화를 위해 추가적인 연구가 필요함을 지적하였다⁶⁾.

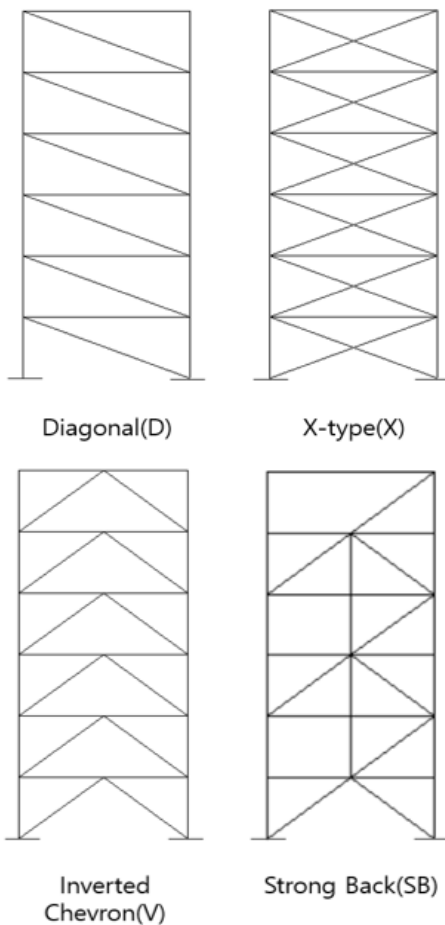
Simpson & Mahin(2018)은 실제 규모의 준정적 실험(Quasi static test)을 통해 1970년대 및 1980년대에 주로 사용하던 2층 가새 골조와 비교하여 개선한 SB가 연약층을 효과적으로 방지하고 변위를 균일하게 분배하는 것을 확인하였다. 또한 Offset 배열을 통해서 BRB와 보에 대한 소성 변형 요구를 낮추어 횡 변위에 대한 손상을 줄이고, 구조물에 큰 연성과 에너지 소산 능력을 발휘한다는 것을 확인하였다⁷⁾.

Slovenec et al.(2017)은 기존의 CBF에 SRC(Stiff Rocking Core)를 추가하여 연약층 형성을 방지하는 시스템을 연구했다. 실험은 실제 크기 1/3의 축척을 가지는 3층과 6층 규모로 진행하였다. 이를 통해

SRC가 연약층 형성을 방지하는데 효과적임을 증명하였고, 현재 기준을 충족하지 못하는 CBF 구조에 SRC를 추가하였을 때 목표하는 성능을 만족함을 확인하였다<Fig. 3>⁸⁾.



<Fig. 3> SRC analytical model to be substructured⁸⁾



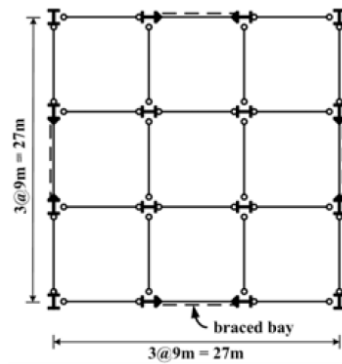
<Fig. 4> Elevation views of four bracing configurations

3. 연구 개요

3.1 연구 표본

<Fig. 4>와 같이 대각선형(이하 D), X형(이하 X), 역V형(이하 V), Simpson & Mahin(2018)의 NCBF-B-3SB를 쌓아 Tie로 묶은 SB형(이하 SB), 총 4개의 가새 골조를 표본으로 하여 Midas Gen의 푸쉬오버를 이용해 해석하고 추출한 데이터를 비교 분석하였다.

구조 평면은 <Fig. 5>와 같으며 각층의 높이가 4m인 6층의 건물이다. 모든 횡력은 가새가 설치된 곳에서 지지하도록 하였고, 가새가 설치된 스패의 보-기둥 접합부는 모멘트 접합, 나머지는 전단 접합으로 하였다⁹⁾.



<Fig. 5> Plan view of building

3.2 Midas 모델링

표본은 KBC2016의 기준을 참고하여 설계하였다. 표본 구조물은 지진 구역 1에 해당하는 서울 근교의 근린 생활 시설로 하였으며 계수 하중은 지붕층 12.36kN/m², 나머지 층 12.16kN/m²으로 설정했다. 지진 하중은 <Table 1>로 설정하였으며, D, X, V에 사용된 부재의 단면과 강재는 <Table 2>, SB에 사용된 부재의 단면과 강재는 <Table 3>에 정리하였다. 이는 정적 탄성 해석을 진행하였을 때 최대 하중 조합에 대해 KBC2016을 만족하는 단면과 강재를 사용한 것이다^{10),11)}.

〈Table 1〉 Set seismic load

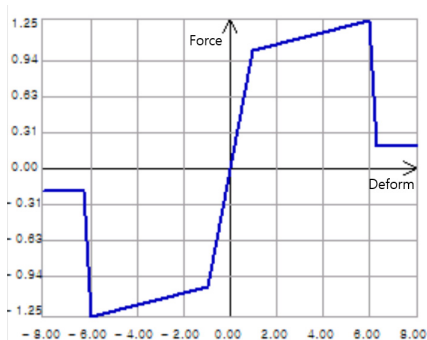
Seismic load	
Categorize	A
Zone factor	0.22g
Site class	Sd
Seis. use & Importance	1.0(II)
Response modification factor (R)	3-b. Intermediate moment frame R(4.5), ρ (3.0), Cd(4.0)
Performance level	LS (Life Safety Level)

〈Table 2〉 Section and material of D, X and V

Member	Section	Material
Column	W 14 X193	SS275
Beam	W 21 X182	SS275
Brace	HSS 8X8X5/8	SRT275

〈Table 3〉 Section and material of SB

Member	Section	Material
Column	W 14 X193	SS275
Beam	W 21 X182	SS275
Brace_up, right	HSS 8 X8 X5/8	SRT275
Brace_down, right	HSS 6 X6 X1/2	SRT275
Brace, left	W 10 X49	SRT275
Tie (2-3)	HSS 10 X10 X1/2	SRT275
Tie (4-5)	HSS 8 X8 X1/2	SRT275



〈Fig. 6〉 Hinge property in beam

소성 힌지는 FEMA356의 Steel 힌지 속성을 이용하여 힌지에 적용된 내력에 따라 탄성, 항복, 연성,

파괴의 단계로 나뉘었다. 보와 기둥은 축력과 모멘트의 상호작용을 고려하여 소성 힌지가 부재 단부에 집중되도록 모델링하였다. 가새는 축력만 고려하여 소성 힌지가 부재의 중심에 집중되도록 모델링하였다<Fig. 6>¹¹⁻¹³).

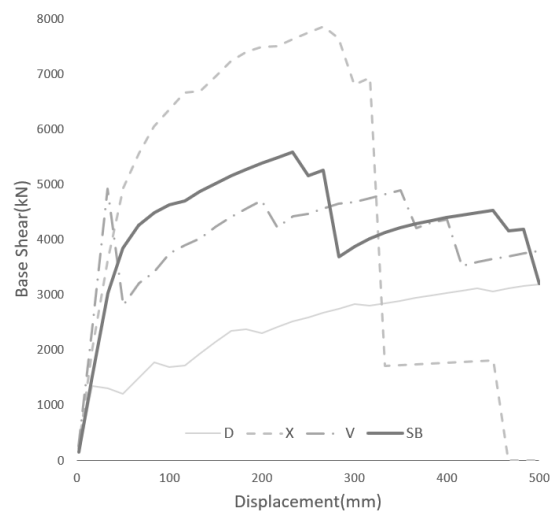
푸쉬오버 해석을 이용하였으며 주절점에서 500mm까지의 변위 하중을 가하여 거동을 관찰하였다. 가력은 최종 지붕 변위를 총 30번의 단계로 나누어 실행하였고 이를 Step으로 표기하였다.

이와 같은 입력 자료를 토대로 푸쉬오버 해석을 진행하였다. 밀면 전단력 vs. 변위(Base shear vs. Displacement), 층 vs. 층간 변위비(Story vs. Story drift ratio), 힌지의 상대 등을 추출하여 결과를 검토하였다.

4. 해석 결과의 검토

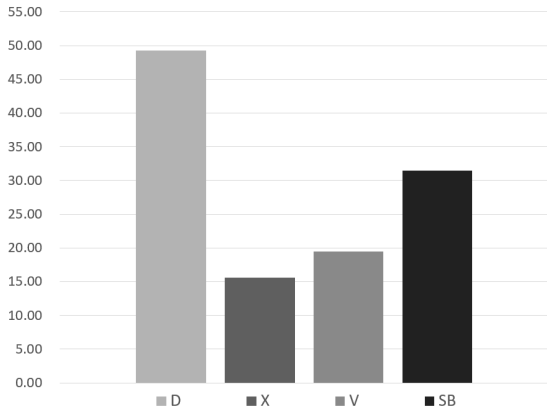
4.1 표본의 푸쉬오버 해석

4.1.1 밀면 전단력



〈Fig. 7〉 Displacement vs. Base shear

〈Fig. 7〉은 500mm까지 푸쉬오버 해석을 진행하여 얻은 밀면 전단력과 변위(Base shear vs. Displacement)의 그래프이다. 가새들의 최대 밀면 전단력을 SB 기준으로 비교하면 D(0.57), V(0.88), SB(1.00), X(1.41) 순서로 크게 나타난다. 이는 X와 SB가 지진에 효과적으로 저항함을 의미한다¹⁾.



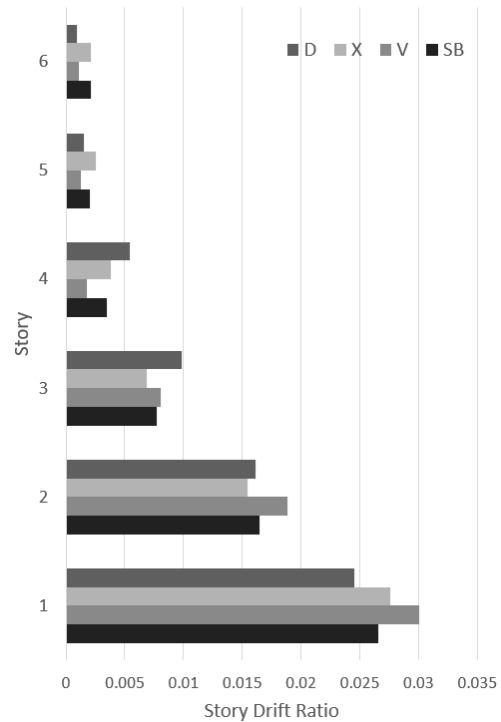
〈Fig. 8〉 Ductility capacity

연성 능력은 재료의 항복 후 건물이 파괴되지 않고 변형이 이루어지는 능력이며, 수치가 높을수록 지진과 같은 갑작스럽고 강한 하중에 붕괴되지 않고 견뎌줄을 의미한다. 연성 능력은 연성비로 나타내며 최대 변위에 항복 변위를 나누어 표현된다. <Fig. 8>은 표본의 연성 능력을 나타내며, X(0.49), V(0.62), SB(1.00), D(1.57) 순서로 강한 연성 능력을 보였다. 푸쉬오버 해석 진행을 통해 건물의 붕괴 순서가 X, V, SB, D인 것을 확인함으로써 연성비의 정확도를 검증하였다.

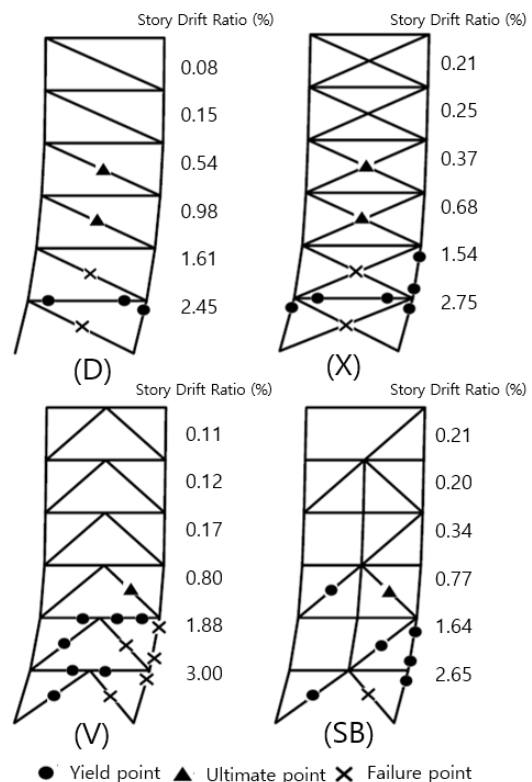
밀면 전단력과 연성비의 결과를 보면 SB는 D, V보다 지진에 효과적으로 저항하고 V, X보다 연성 능력이 우수한 것을 확인할 수 있다. 이는 강하게 지진에 저항하나 연성 능력이 부족한 X와 연성 능력이 우수하나 지진에 저항하는 능력이 낮은 D, 두 가새 골조의 결함을 보완한다고 판단된다.

4.1.2 연약층

<Fig. 9>는 SB가 최대 밀면 전단력을 가지는 Step-14의 층간 변위비(Story drift ratio)를 층별로 나타냈으며, 표본의 층간 변위비를 층별로 비교하기 용이하다고 판단되는 그래프로 표현하였다. 최하층부의 층간 변위비는 D, SB, X, V 순서로 나타났으며, 최상층부의 층간 변위비는 D, V, X, SB 순서로 나타났다. SB는 최하층부에서 상대적으로 작은 층간 변위비를 보이고, 최상층부에서는 상대적으로 높은 층간 변위비를 보였다. 이는 타 가새와 비교하여 에너지를 상층부로 전달하는 능력이 우수함을 의미한다.



〈Fig. 9〉 Story drift ratio vs. Story



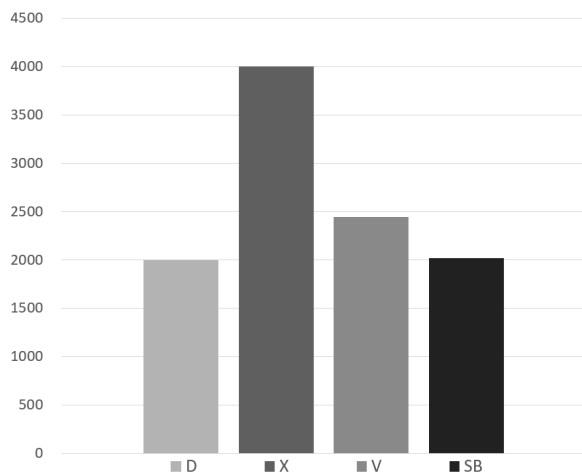
〈Fig. 10〉 Behavior and story drift ratio in steel frame

<Fig. 10>은 500mm까지 푸쉬오버한 30개의 Step 중 14-step의 힌지 상태를 도형으로 표시하고, 변위의 축척을 고려하여 거동과 층간 변위비를 나타낸 것이다. 모든 표본에서 1층 기둥에 항복 또는 파괴가 발생하였다. 특히 V는 기둥의 파괴로 인해 생긴 연약층이므로 하층부의 보와 기둥, 압축 및 인장 가새에서 소성 변형이 집중되고 모든 부재들이 역량만큼의 역할을 수행하고 있지 않음을 뚜렷하게 보여준다.

푸쉬오버를 진행하는 동안의 거동을 살펴보면 기둥의 파괴는 V, X, SB 순서로 발생했다. V는 Step-8, X는 Step-17, SB는 Step-28에서 발생하고 D는 푸쉬오버 해석을 진행하는 동안 기둥의 파괴가 일어나지 않았다. 500mm의 푸쉬오버를 진행하는 동안 D는 하층부의 기둥 파괴가 일어나지 않아 상대적으로 상층부까지 에너지가 전달되었으며, X는 하층부의 연약층으로 인해 상층부로 에너지를 분산시키지 못한 것을 상층부의 층간 변위로 확인할 수 있었다. V는 타 가새들에 비해 이른 기둥의 파괴로 연약층이 형성되고 하층부의 부재도 이른 파괴를 보였다. SB의 연약층은 다소 늦게 형성되었으며, 형성된 후에도 상층부로 에너지를 전달하는 것을 층간 변위비를 통해 확인하였다.

층간 변위비와 거동의 결과를 통해 SB는 상층부로 에너지를 전달하는 능력과 연약층 형성 방지가 우수함을 확인하였다.

4.1.3 물량



<Fig. 11> Quantity of brace (Unit: kg)

<Fig. 11>은 구조물에 사용된 가새의 물량을 그래프로 나타낸 것이다. SB의 가새는 동일한 강재의 다른 단면이므로 가새의 길이에 밀도를 곱한 중량을 통해 물량을 산출하여 비교하였다. D(0.99), SB(1.00), V(1.21), X(1.98) 순서로 많은 물량을 사용하였으며, D와 SB는 근소한 차이를 보이므로 동일한 물량으로 판단하였다. 결과적으로 SB가 최소의 물량이 사용되었다.

4.2 해석 결과 비교

앞서 진행한 해석을 통해 추출한 값들을 지진의 저항력을 나타내는 밀면 전단력, 지진과 같은 하중에 붕괴되지 않고 견디는 연성 능력, 연약층 형성 순서를 확인하기 위한 기둥의 파괴 순서, 경계성을 비교하기 위한 가새의 물량까지 총 4가지의 기준으로 비교하여 <Table 4>에 정리하였다. 이를 살펴보면 SB가 특별히 우월한 성능을 보이는 것은 아니지만 고려한 모든 기준에서 상위권에 위치한다. 그러므로 SB가 다각도로 우수한 성능을 보유함을 검증한다.

<Table 4> Result of comparison

Rank	Base shear	Ductility capacity	Column failure order	Quantity of brace
1	X	D	D	D=SB
2	SB	SB	SB	
3	V	V	X	V
4	D	X	V	X

5. 결론

본 연구에서는 지진 발생 시 중심 가새 골조에서 형성되는 연약층을 방지하기 위한 Strong-Back(SB) 시스템을 소개하고 다른 가새 골조와의 비교를 통해 성능을 검증하였다.

1) 타 골조의 밀면 전단력을 비교했을 때 SB가 지진에 충분히 저항할 수 있음을 증명하였다. 또한 연성 능력을 이용해 SB가 X, V에 비해 지진 하중으로 인한 항복 후 붕괴까지 충분한 시간을 보유함을 확

인하였다.

2) 층간 변위비의 비교를 통해 SB가 상층부로 에너지를 분산하는 능력이 상당히 높으며, 기둥의 항복 또는 파괴 순서를 통한 연약층의 형성 순서가 우수함을 증명하였다. 또한 소량의 강재를 사용함으로써 경제성을 보여준다.

3) SB는 일반적인 건물과 같은 허용 응력 설계법으로 설계 시 기존의 연약층 형성을 막는 시스템의 강성, 강도, 부재 사이즈를 파악하기 어렵다는 단점을 보완한다고 판단된다.

4) 이와 같은 연구를 통해 타 가새에 비해 SB가 연약층 거동을 방지하는데 충분한 능력이 있음을 증명하였다. 그러나 연구의 실험만으로는 실무에 반영하는데 한계가 존재한다. 이를 개선하기 위해서 향후 다음과 같은 연구가 진행되어야 한다.

(1) 다양한 SB의 가새 배열, 층 높이, 층수 등의 변수를 통해 다양한 가능성을 검토한다.

(2) 탄성과 비탄성 사이의 접합부, 보와 기둥의 접합부, 기초 주각부의 세부 설계가 필요하다.

(3) 비선형 동적 해석을 통하여 세밀한 SB의 거동을 확인하고, BRB를 포함한 에너지 소산 능력을 증진한다. 이를 통해 지진 발생 시 예상되는 동적 특성을 포함한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문을 위한 2019년도 서울과학기술대학교의 지원에 감사드립니다.

References

1. Kim, J., Lee, C., & Han, S. (2005). Seismic Performance Evaluation and Retrofit of Braced Steel Frames (Report No. R01-2002-000-00025-0). Republic of Korea: National Research Foundation of Korea.
2. Seismic Safety Commission, State of California. (1996). 1994 Northridge Earthquake Buildings Case Studies Project: Proposition 122; Product 3.2 (Report No. SSC 94-06). USA: Seismic Safety Commission.
3. Guevara-Perez, L. T. (2012). "Soft Story" and "Weak Story" in Earthquake Resistant Design: A Multidisciplinary Approach. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Portugal
4. Whittaker, A., Uang, C. -M., & Bertero, V. (1990). An experimental study of the behavior of dual steel systems (Report No. UCB/EERC 88/14). Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
5. Yang, C., Leon, R. T., & DesRoches, R., "Pushover Response of a Braced Frame with Suspended Zipper Struts", Journal of Structural Engineering, Vol.134, No.10, pp.1619~1626, 2008
6. Lai, J., & Mahin, S., "Strongback System: A Way to Reduce Damage Concentration in Steel-Braced Frames", Journal of Structural Engineering, Vol.141, No.9, 2015
7. Simpson, B. G., & Mahin, S., "Experimental and Numerical Investigation of Strongback Braced Frame System to Mitigate Weak Story Behavior", Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.2, 2018
8. Slovenec, D., Sarebanha, A., Pollino, M., Mosqueda, G., & Qu, B., "Hybrid Testing of the Stiff Rocking Core Seismic Rehabilitation Technique", Journal of Structural Engineering, Vol.143, No.9, 2017
9. Lee, C., & Kim, J. (2004). Seismic Performance Evaluation of Steel Centrally Braced Frames with Considering P- Δ Effects. Proceedings of the Architectural Institute of Korea, Republic of Korea, Vol.24, No.1, pp.107~110
10. Architectural Institute of Korea, "Korea Building Code and Commentary", 2016.
11. FEMA 356, "Prestandard and commentary

on the seismic rehabilitation of buildings.”, Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2000.

12. FEMA 440, “Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures”, Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997.

13. Midas Gen, “Midas gen User’s Manual, v875 R3”. Midas IT, 2018.

- Received : September 09, 2019
- Revised : September 25, 2019
- Accepted : September 25, 2019