

저항복강 강판전단벽 골조의 구조거동에 관한 해석적 연구

곽습¹ · 황보경² · 유흥식³ · 김영주⁴ · 김태수^{5*}

¹석사과정, 한양대학교 에리카, 스마트시티공학과, ²박사후연구원, 한양대학교 ERICA, 인공지능건설기술연구센터, ³공학박사/수석연구원, 포스코철강솔루션연구소, ⁴대표, 한국건축구조연구원, ⁵교수, 한양대학교 ERICA, 건축학부

Numerical Study on Structural Behaviors of Low-Yield Point Steel Plate Shear Wall

Guo, Yi¹, Hwang, BoKyung², Ryu, HongSik³, Kim, YoungJu⁴, Kim, TaeSoo^{5*}

¹Graduate Student(Master Course), Dept. of Smart City Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15587, Korea

²Post-doctoral Researcher, AI Construction Technology Research Center, Hanyang University ERICA, Ansan, 15587, Korea

³Ph.D/Researcher, POSCO Global R&D Center, Incheon, 21985, Korea

⁴President, Korea Institute of Structural Engineering & Consulting, Busan, 47783, Korea

⁵Professor, School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15587, Korea

Abstract - This study aims at investigating the performance of Low-yield point steel(HSA80 in Korea) steel plate shear walls under cyclic loading for wall thickness reduction and seismic retrofit before the experiments. The hysteretic behavior of various structural frame types, including steel plate shear wall frame (SPSWs), SPSWs with center opening, moment frame, and braced frame, was compared through finite element (FE) analysis. The target specimens consisted of three-story frames with a single span, resulting in a total of seven specimens. These specimens included four steel plate shear wall frames, one center opening frame, one moment resisting frame, and one braced frame. The analysis model for frame specimens was developed without considering detailed parts such as welded and bolted connections. The analysis results indicated that HSA80 shear steel plate wall frames demonstrated significant ductility, energy dissipation capacity, and strength compared to those of moment frame and braced frame.

Keywords - Steel plate shear wall, Low-yield point steel, Cyclic loading, Energy dissipation capacity, Finite element analysis

1. 서론

강판전단벽골조(steel plate shear wall, SPSW)는 기둥-보 라멘골조와 박판의 웹 강판을 결합하여 구성되며, 횡력저항 시스템 중의 하나로 건축물의 내진성능 향상을 위해 많이 적용되었다. Choi and Park^[1]은 기존 실험결과를 토대로 유한요소해석 방법으로 쉘(shell) 요소 모델의 해석결과에서 인장응력장(tension field ac-

tion)의 응력-변형을 관계를 도출하였고, 박판의 강판 전단벽의 비선형 주기적 거동을 양호하게 예측할 수 있는 강판전단벽 이력모델을 개발하였다. Azandariani *et al.*^[2]은 반복하중을 받는 저항복강(low-yield strength steel) SPSW는 1경간 3층 1/3 축소모델로 강판전단벽 골조(기둥과 보는 각각 모멘트저항과 핀접합 형태) 실험체 두 개를 제작하였다. 이 실험체에 대한 실험적·해석적 연구를 수행한 결과, 모멘트저항 접합부는 핀접합부에 비해 강도가 25 % 증가한 것을 확인하였다. Khan and Srivastava^[3]는 다양한 유형의 개구부를 가진 SPSW 시스템의 비탄성 거동을 평가하였고, 강판 개구부가 임의로 배치된 SPSW의 전단강도 및 강성 저하 모델을 제안하였다. 그 결과, 강판 개구부의 크기와 위치는 SPSW 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 강판 개구부의 크기는 15 % 미만인

Note.-Discussion open until June 30, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 10, 2023; revised on November 17, 2023; approved on November 20, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-400-5131 Fax. +82-31-400-5959

E-mail. tskim0709@hanyang.ac.kr

고 가로세로 비율이 1.0인 사각형과 원형 중에서 강판의 중앙-하단에 개구부가 위치할 때 가장 구조성능이 우수한 것으로 확인되었다.

최근 국내에서도 100 MPa급 저항복강(HSA80)이 개발됨에 따라 이를 적용한 구조부재의 거동에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 저항복강은 보통강에 비하여 저(低)항복점, 고(高)연신율, 반복하중에 대한 우수한 피로 특성 등 다양한 이점을 가지고 있다. 저항복강은 보통강에 비해 우수한 변형능력을 지니며, 저항복강 HSA80의 항복강도는 일반구조용 압연강재 SS275 항복강도의 1/2 이하 정도이며, 연신율은 최소 2배 이상이다. 또한 지진 발생 시 더 많은 에너지를 흡수할 수 있다^[4]. Kim *et al.*은 국내 저항복강(HSA80)의 재료적 성질을 유한요소해석모델에 적용하여 H형 단면 심재 및 양단에 튜브를 채택한 비충전형 좌굴방지개를 제안하고, 연성이 낮은 골조에서도 충분한 에너지흡수능력을 발휘하는 것을 확인하였다^[5].

이 연구는 반복하중을 받는 저항복강(HSA80)을 적용한 강판전단벽에 대한 실험 수행 전에 강판전단벽 실험체(저항복강 강판전단벽 골조, 중간개구부 강판전단벽 골조)와 비교군 실험체(탄소강 강판전단벽 골조, 모멘트저항골조, 가새골조)의 구조성능을 유한요소해석적 방법을 통해 조사·비교하는 것을 목적으로 한다.

2. 유한요소해석 및 재료모델

2.1 해석모델 계획

저항복강 강판전단벽 골조 및 비교 골조실험체의 사

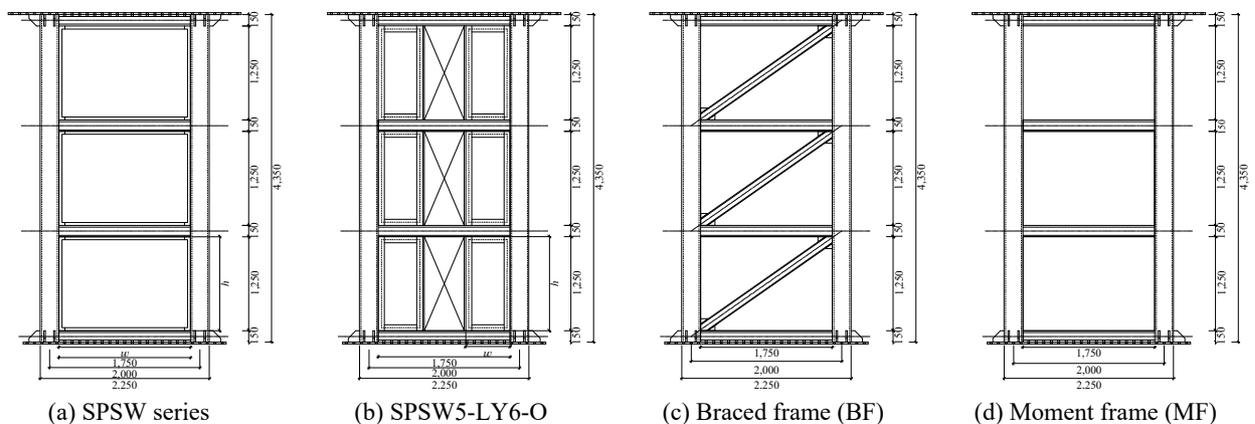


Fig. 1. Shape and geometry of frame specimens (Unit: mm)

전 해석결과에 의한 구조거동을 비교하기 위해 해석모델을 계획하였다. 해석모델은 1경간 3층 1/2 축소모델로 제작한다. 주요 해석모델의 구성과 치수는 Fig. 1에, 해석모델의 주요변수는 Table 1에 정리하였다. 해석모델은 기존 연구를 참조하여 저항복강과 일반 탄소강 강판전단벽골조(SPSW series), 강판중간부 개구부를 갖는 골조(SPSW5-LY6-O), 가새골조(braced frame)와 모멘트저항골조(moment frame)로 구성하였다^{[6],[7]}.

Table 1. List of specimens

Specimen	Steel material	Thickness t (mm)	Aspect ratio (w/h)
Moment frame(MF)*	-	-	-
Braced frame(BF)	SRT275*	-	-
SPSW1-LY3	HSA80	3	1.40
SPSW2-LY4	HSA80	4	1.40
SPSW3-LY6	HSA80	6	1.40
SPSW4-CS3	SS275	3	1.40
SPSW5-LY6-O	HSA80	6	0.44

*Rolled steels for welded structures SM355 are used in all columns and girders.

Fig. 1(a)의 해석모델은 Table 1에서 SPSW1-LY3, SPSW2-LY4, SPSW3-LY6, SPSW4-CS3이고 강판전단벽의 강종 및 두께에 따른 강판전단벽의 강성·강도·파괴형태를 비교하기 위하여 각각 적용강판은 저항복강 HSA80의 평판두께 3 mm, 4 mm, 6 mm, 일반구조용 압연강재 SS275의 평판두께 3 mm를 사용하였다. 골조 한 층의 상하 보 중심 간 높이는 1,750 mm, 좌우 기

등 중심 간 길이는 1,250 mm로 설정하였다. 강판전단벽 실험체의 경우 강판전단벽과 보 및 기둥과의 용접 접합 및 하중전달을 원활하게 하기 위해 Fig. 2와 같이 피쉬플레이트(fish plate)를 설치한다^[8].

Fig. 1(b)는 실험체 SPSW5-LY6-O를 나타내며 건축 계획상 필요에 의해 강판의 중앙에 개구부가 있는 경우의 구조거동을 비교하기 위해 계획하였다. 개구부는 중앙부에 폭 570 mm의 크기로 설정하였으며 개구부 주위를 평판두께 20 mm 스틱프너로 보강하였다.

Fig. 1(c)와 Fig. 1(d)는 비교용 해석모델로 기존의 고층건물에서 횡력저항시스템으로 사용되고 있는 대각가새골조(braced frame)와 모멘트저항골조(moment frame)를 나타낸다.

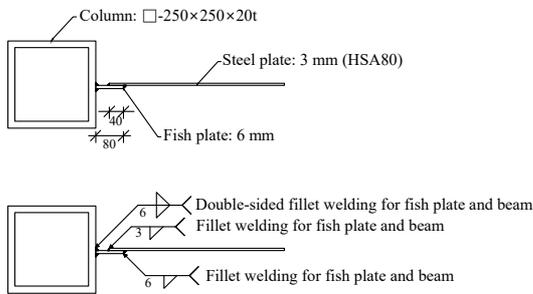


Fig. 2. Welding between fish plates and steel plate shear wall (SPSW1-LY3)

2.2 해석모델 모델링

반복하중을 받는 Table 1의 골조 해석모델의 이력거동을 고찰하기 위하여 정적·동적 해석에 널리 사용되는 비선형 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 해석모델의 기둥과 보는 용접구조용 압연강재 SM355를 사용하여 용접조립(built-up)으로 제작하였다. Fig. 3(a)와 같이 기둥단면은 □-250×250×20이다. 보의 형상은 설치 위치에 따라 다음과 같이 다양한 단면을 적용하였다. 보 단면의 경우는 콘크리트 슬래브 내에 매입되어 목표 높이와 구조적 성능을 확보하기 위해 계획되었으며, 기본 단면으로 Fig. 3(b)와 같이 2층 및 3층 보는 비대칭용접 H형강 단면인 PH-150×250×150×12×25×15로 선정하였다. Fig. 3(c)와 같이 최상부 보는 최상부 가력용 프레임 고정하기 위해 높은 휨강성을 갖는 H형강 단면 PH-150×250×15×25로 하였고, Fig. 3(d)에 나타낸 1층의 최하부 보는 2층 및 3층 보와 동일한 비대칭 단면이

지만 하부면 지그와의 접합과 보웨브의 국부좌굴을 방지하기 위해 보 웨브 두께를 증가시킨 비대칭 H형강 단면 PH-150×250×150×15×25×25로 선정하였다.

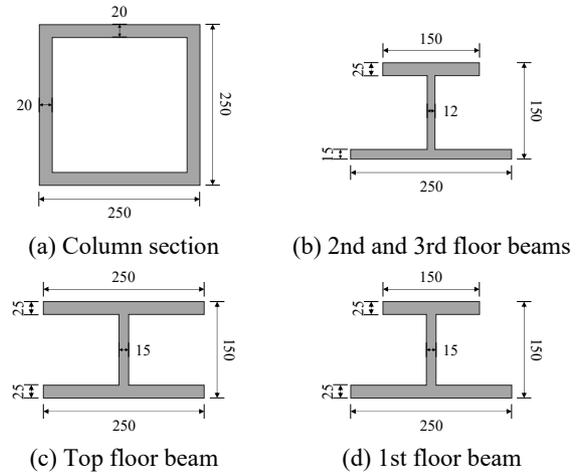


Fig. 3. Shape and geometry of column and beam (Unit: mm)

해석모델의 해석시간을 단축하기 위하여 솔리드 요소가 아닌 기존 연구에서 채택한 4절점 쉘(shell) 요소인 S4R 요소를 적용하였다^{[9],[10]}. Fig. 4에는 유한요소해석모델과 사용된 경계 및 하중조건을 나타냈다.

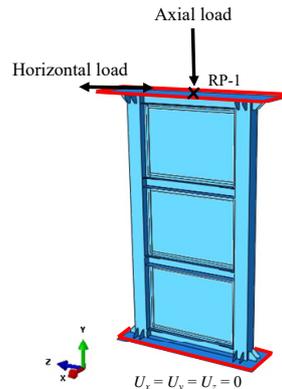


Fig. 4. Numerical model of SPSW series

골조의 용접부분은 기둥, 보, 기초판, LHS(lengthened horizontal stiffeners) 및 rib plate는 Instance에서 ‘Merge’ 기능으로 합병하였고 이를 제외한 모든 요소는 ‘Tie’로 연결하여 모델링하였다. 해석모델의 상부에는 보의 중심에 임의의 절점 ‘reference point(RP점)’을 생성하여 윗면과 절점을 ‘Tie’로 구속한 후 z 방향으로 변위제어 방법으로 반복가력하였다. 골조하부는 고정단($U_x = U_y = U_z = 0$)으로 가정하였다. 또한, 바닥 및 골조의 자중에 의한 영향을 고려하기 위해 y축 방향(중

력방향)으로 기둥의 항복내력의 10 %에 해당하는 축력을 집중하중(1,438.6 kN)으로 입력하였다.

가력계획은 ATC-24의 ‘Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures’^[11]에 따라 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 설정하였다. 실험체 총높이인 4,200 mm를 기준으로 층간변위비(drift ratio)를 정의하여 반복가력을 수행하였다. Fig. 1에서 우측방향 가력을 ‘+(positive)’, 좌측방향 가력을 ‘-(negative)’로 가력프로토콜을 설정하였다.

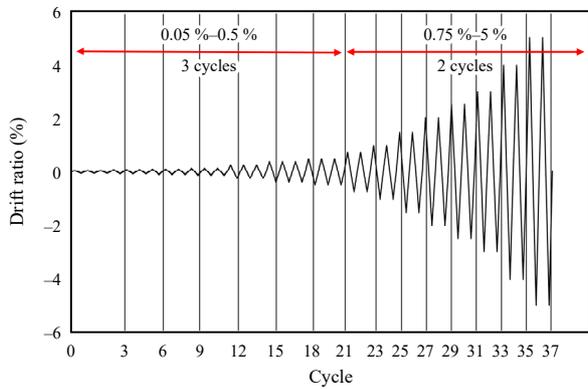


Fig. 5. Loading protocol

해석모델의 신뢰성을 확보하기 위해 실험계획과 동일한 경계조건 및 부재 크기를 적용하였다. 실제 강판의 운반 중 변형, 용접으로 인한 잔류응력과 시공 시 오차로 인한 영향을 반영하기 위하여 강판의 초기 변형(initial imperfection)을 해석모델에 입력하여 좌굴해석을 수행하였다. 면외방향으로 발생한 1차 좌굴모드형상을 초기 불완전성으로 고려하였다. 1차로 탄성좌굴해석(buckling analysis)을 수행하여 전체 좌굴모드와 국부좌굴모드를 확인하고, 이를 통해 얻어진 고유치(eigenvalue)를 이용하여 비선형 준정적 2차해

석을 수행하였다.

강판의 좌굴과 하중이 제하(unloading) 후 가력방향이 바뀌어 재하(reloading) 시에 발생하는 snap-through를 고려하기 위해 외연적 적분법(explicit integration method)을 활용하여 준정적해석(quasi-static analysis)을 적용하였다.

2.3 재료모델

해석모델에 사용된 강종의 재료 데이터는 기존 연구자 Shin and Kim^[12]의 재료시험결과를 참조하였다. 강판전단벽 강판은 저항복강(HSA80)과 일반구조용 압연강재(SS275)를, 기둥과 보의 SM355를 적용하였고, 적용강판의 항복강도 및 인장강도를 Table 2에 정리하였다. 또한 미세스 항복조건 및 등방경화법칙이 적용되는 탄소성 재료모델을 채택하였다. 인장시험결과로부터 얻어진 Fig. 6와 같이 강재의 공칭응력-공칭변형률 선도(nominal stress-strain curve: $\sigma_n - \epsilon_n$)를 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 인장시편의 단면적 변화가 고려된 진응력-진변형률 곡선(true stress-true strain curve: $\sigma_t - \epsilon_t$)으로 변환하고, 탄성영역 이후의 소성영역 거동은 식 (3)에 따라 전체 변형률(ϵ_e)에서 탄성변형률(σ_e/E)을 공제한 소성변형률(ϵ_p)을 입력하였다.

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \epsilon_e) \tag{1}$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \tag{2}$$

$$\epsilon_p = \ln(1 + \epsilon_e) - \frac{\sigma_e}{E} \tag{3}$$

여기서, σ_t 는 진응력, σ_e 는 공칭응력, ϵ_e 는 공칭변형률, ϵ_t 는 진변형률, E 는 탄성계수이다.

강재에 대한 비탄성 해석을 수행하기 위해서 등방경화(isotropic hardening)모델을 사용하였다.

Table 2. Mechanical properties of materials

Steel grade	Elastic modulus E (KPa)	Yield strength F_y (MPa)	Tensile strength F_u (MPa)	Elongation EL (%)	Yield strength ratio ($F_y/F_u - HSA80$)	Yield ratio F_y/F_u (%)
SM355-20T	194,305	390.95	530.90	27.28	4.07	73.64
SM355-25T	201,233	358.52	523.01	27.82	3.73	68.55
HSA80	221,914	96.09	279.86	59.74	1.00	34.34
SS275	205,095	293.45	423.18	34.76	3.05	69.34

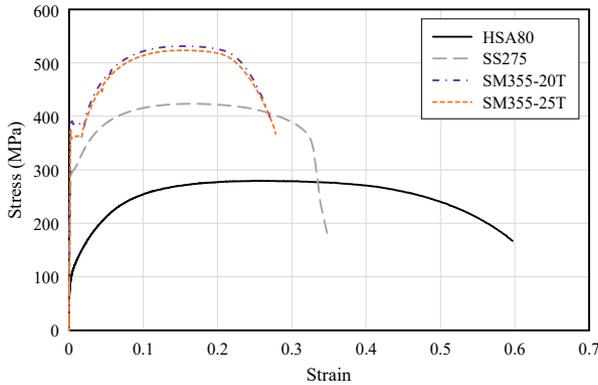


Fig. 6. Nominal stress-strain curve

3. 유한요소해석결과

3.1 하중-변위 관계

해석결과로부터 얻은 각 실험체의 하중-횡변위(drift ratio) 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 각 해석모델별 최대내력(P_{ua}^+ , P_{ua}^-)과 초기강성(K_1^+ , K_1^-)은 Table 3에 정리하였다. 강판전단벽을 포함하는 SPSW1-LY3, SPSW2-LY4, SPSW3-LY6, SPSW4-CS3, SPSW5-LY6-O는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 강판 부분은 대각선 방향으로 명료한 인장응력장(tension field)이 형성되었다. 강판전단벽골조(SPSW series)는 모멘트저항골조(MF)에 비해 동일변위 기준 최대내력과 초기강성이 높게 나타났고, 가새골조(BF) 실험체의 ‘+’ 최대강도 및 초기강성에 비해 강판전단벽골조가 유사하거나 높은 성능을 확보하는 것으로 확인되었다.

최대강도와 초기강성을 골조별로 비교하기 위해 모멘트골조(MF)를 기준으로 최대내력비($P_{ua}/P_{ua,MF}$) 및 초

기강성비($K_1^+/K_{1,MF}^+$)를 산정하였다. 저항복강 6 mm 강판전단벽인 SPSW3-LY6이 최대강도 및 초기강도가 가장 높게 나타났고, 모멘트골조(MF)를 기준으로 최대강도비는 1.43–2.32, 초기강성비는 5.16–10.27 범위로 나타났다. 가새골조(BF)는 Fig. 1(c)와 같이 한 방향으로만 가새가 설치되어 ‘+’ 가력 시 가새는 인장력이, ‘-’ 가력 시에는 압축력이 작용하였다. 압축력이 작용하는 경우 좌굴이 발생하여 Table 3에서 알 수 있듯이 ‘-’ 가력의 최대강도와 초기강성이 ‘+’ 가력보다 낮았다.

SPSW1-LY3, SPSW2-LY4, SPSW5-LY6-O와 가새골조(BF)의 ‘+’ 영역에서의 최대강도는 유사하게 나타났다. 탄소강 3 mm 강판전단벽 SPSW4-CS3 해석모델의 최대강도는 저항복강 4 mm SPSW2-LY4에 비해 최대내력이 약 6 % 높게 나타났지만, Table 2에서 탄소강 SS275의 항복강도는 HSA80보다 3.05배 높은 것에 비해 면외좌굴 발생에 따라 내력상승 정도는 높지 않은 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 가새골조(BF)에서는 가새설치로 마감을 고려해 총 벽두께가 강판전단벽에 비해 증가하며 탄소강 3 mm 강판전단벽골조와 저항복강 4 mm 강판전단벽 골조로 가새골조 이상의 골조의 수평전단강도와 초기강성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

3.2 파괴양상

해석모델에 대한 고유치 해석을 통해 얻은 1차 좌굴 모드 형상을 Fig. 8에 나타냈다. 해석결과로 얻어지는 등가소성변형률(equivalent plastic strain, PEEQ)은 재료의 비탄성변형분포로부터 파단 및 손상 가능 위치를

Table 3. Analysis results

Specimen	Maximum strength P_{ua} (kN)				Initial stiffness K_1 (kN/mm)			
	Positive(+)	Negative(-)	$P_{ua}^+/P_{ua,MF}^+$	$P_{ua}^-/P_{ua,MF}^-$	Positive(+)	Negative(-)	$K_1^+/K_{1,MF}^+$	$K_1^-/K_{1,MF}^-$
Moment frame(MF)	1,489.75	1,477.89	1.00	1.00	16.10	16.08	1.00	1.00
Braced frame(BF)	2,776.93	2,111.09	1.86	1.43	83.09	83.12	5.16	5.17
SPSW1-LY3	2,482.04	2,464.72	1.67	1.67	86.55	89.69	5.38	5.58
SPSW2-LY4	2,785.89	2,784.25	1.87	1.88	120.77	118.33	7.50	7.36
SPSW3-LY6	3,457.76	3,424.78	2.32	2.32	165.13	165.21	10.26	10.27
SPSW4-CS3	2,949.05	2,924.25	1.98	1.98	96.01	96.03	5.96	5.97
SPSW5-LY6-O	2,732.07	2,727.34	1.83	1.85	90.31	90.16	5.61	5.61

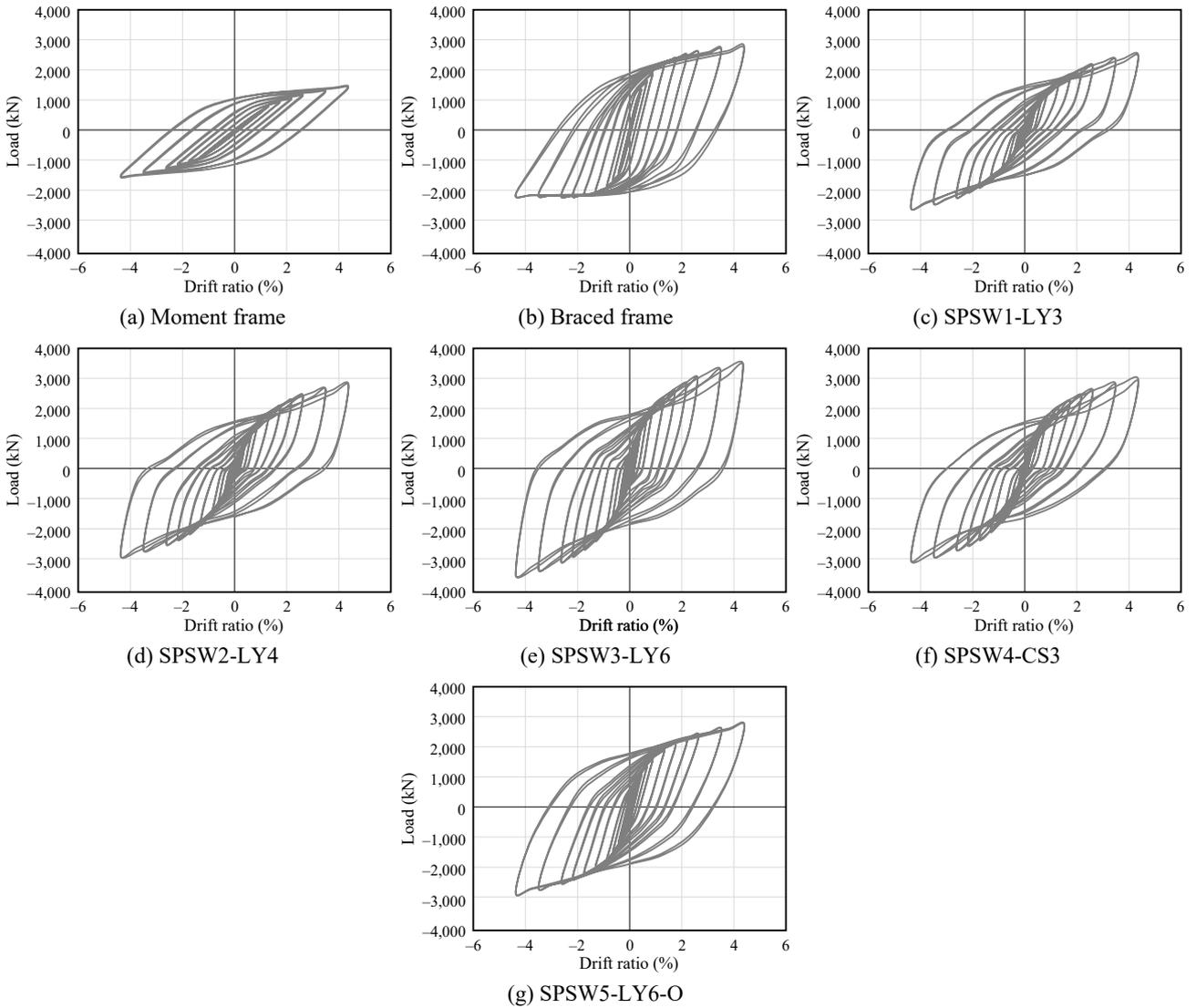


Fig. 7. Load-drift ratio curve of specimens

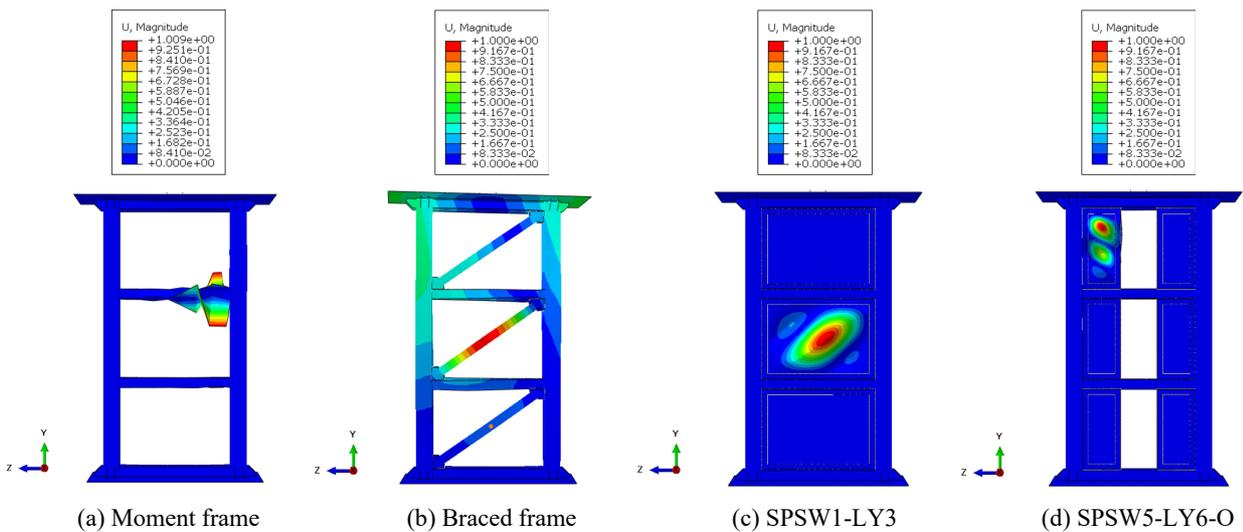


Fig. 8. Buckling modes of specimens by Eigenvalue analysis

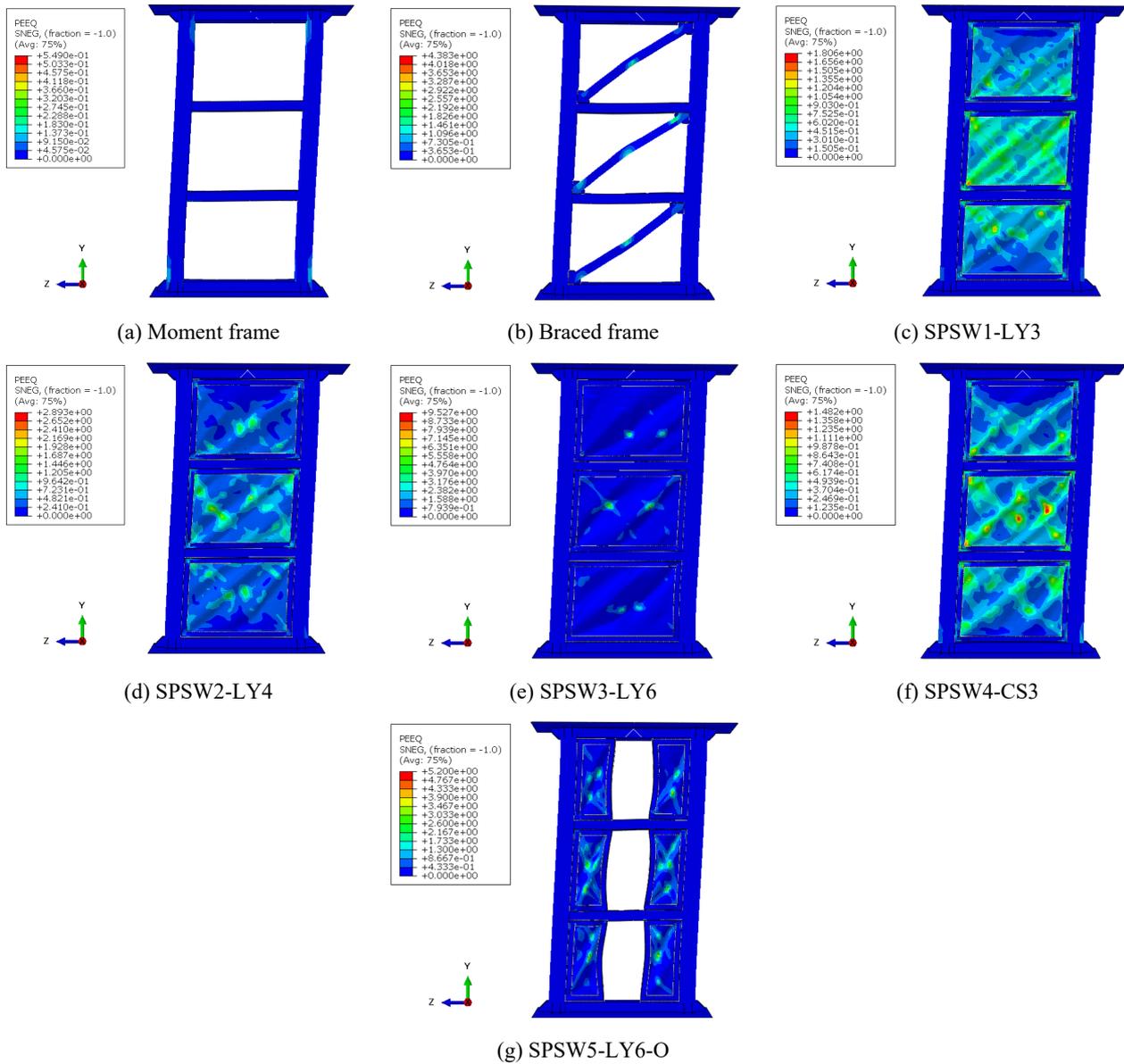


Fig. 9. PEEQ distributions at ultimate state

확일할 수 있는 스칼라 변수이다.

Fig. 9에 최대내력 시점에서 각 해석모델의 등가소성 변형률 분포를 나타내었다. Fig. 9(a) 및 Fig. 9(b)와 같이 모멘트골조(MF)의 PEEQ는 주로 기둥의 하단부와 상단부에 집중분포하였으며 가새골조(BF)의 PEEQ는 주로 가새 중앙부에 분포하였다. Fig. 9(c), Fig. 9(e), Fig. 9(f)에서 SPSW2-LY4, SPSW4-CS3, SPSW5-LY6-O의 주요 PEEQ는 강판전단벽과 피쉬플레이트(fish plate)에 집중되었다. 반면에 SPSW1-LY3와 SPSW3-LY6는 Fig. 9(d)에서와 같이 PEEQ는 강판전단벽에만 집중분포하는 것으로 나타났다.

3.3 포락곡선

Fig. 7에서 각 하중단계의 첫 번째 사이클 동안의 최대강도를 연결하여 포락곡선(skeleton curve)을 구하였다. Fig. 10에서는 각 실험체의 포락곡선을 비교하였다. 각 해석모델의 곡선에서 뚜렷한 항복점이 관찰되지 않았으며, 항복 이후 소성영역에서 변위가 증가함에 따라 강성이 감소하였고, 골조형태에 따라 감소 정도가 상이했다^[13]. 항복점에서의 항복변위와 항복내력(δ_{ya} , P_{ya})은 Fig. 11과 같이 각 실험체의 포락곡선으로 둘러싸인 부분의 면적 ①과 이상화된 탄소성곡선으로 둘러

짜인 부분의 면적 ②가 동일하도록 등가에너지 방법으로 정의하였다^{[8],[13]}.

각 해석모델의 항복내력(P_{ya}), 항복변위(δ_{ya}), 항복내력에 대한 최대내력의 강도비(P_{ua}/P_{ya}) 및 연성비(δ_{max}/δ_{ya})를 Table 4에 정리하였다.

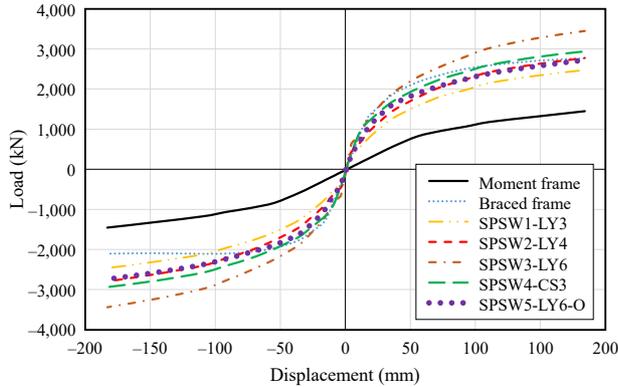


Fig. 10. Skeleton curve of the specimens

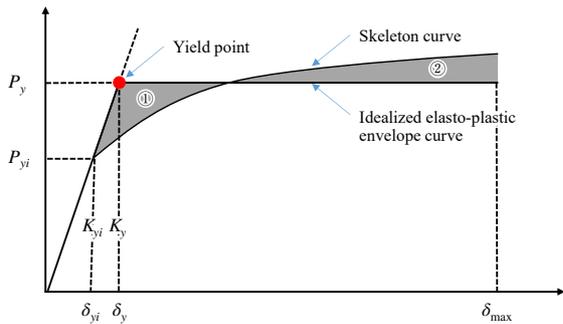


Fig. 11. Definition of yield point

강판전단벽골조(SPSW series)는 전반적으로 가새골조 및 모멘트저항골조보다 높은 항복내력을 나타냈다.

저항복강 6 mm 강판전단벽 골조인 SPSW3-LY6가 4.1 절의 Table 3에서 언급한 바와 같이 내력과 강성이 가장 높았다. 이 연구의 기준모델이 되는 저항복강 4 mm 강판전단벽인 SPSW2-LY4는 SPSW3-LY6보다 정방향 항복내력은 25 % 낮았지만, 탄소강 3 mm 강판전단벽 SPSW4-CS3에 비해 정방향 항복내력이 12 % 증가하였다. 3.0 mm로 두께가 동일한 저항복강 강판전단벽인 SPSW1-LY3는 SPSW4-CS3보다 정방향 항복내력은 16 % 낮았다. 중앙부 개구부를 갖는 SPSW5-LY6-O는 강판전단벽의 중앙에 전체 폭의 1/3의 개구부가 있음에도 불구하고 SPSW2-LY4보다 약 3 % 항복내력이 증가했고 SPSW3-LY6에 비하여 항복내력이 약 18 % 감소하였다.

3.4 에너지소산능력

에너지소산능력(energy dissipation capacity)은 내진 성능 평가에 사용할 수 있다. 누적에너지소산능력(cumulative energy dissipation, CED)은 동일 목표 변위비(drift ratio)에 대해 Fig. 7의 사이클별 이력곡선에 둘러싸인 면적을 누적 합산한 에너지소산능력으로 정의된다^{[5],[6],[14],[17]}. Fig. 12는 각 해석모델의 전체 변위비와 누적에너지소산능력의 관계곡선이다.

Table 4에 각 실험체별 누적에너지흡수능력(CED)과 모멘트골조(MF)를 기준으로 한 에너지소산능력(CED/CED_{MF})을 비교하였다. 모멘트 골조에 비해 가새골조 및 강판전단벽 골조는 2.19~3.09배 높은 누적에너지흡수능력을 보였다. 가새골조와 개구부가 있는 SPSW3-

Table 4. Energy dissipation comparison

Specimen	Yield point						Strength ratio		Ductility		Cumulative energy dissipation CED (kN·m)	CED ratio CED/MF
	Positive loading(+)			Negative loading(-)			P_{ua}/P_{ya}		δ_{max}/δ_{ya}			
	P_{ya} (kN)	δ_{ya} (mm)	Story drift (%)	P_{ya} (kN)	δ_{ya} (mm)	Story drift (%)	Pos. loading (+)	Neg. loading (-)	Pos. loading (+)	Neg. loading (-)		
Moment frame(MF)	1,213.35	75.37	1.79	1,191.00	74.08	1.76	1.23	1.24	2.44	2.48	2,231.74	1.00
Braced frame(BF)	2,444.66	29.41	0.70	1,997.06	24.04	0.57	1.14	1.06	6.25	7.64	6,561.53	2.94
SPSW1-LY3	1,912.85	21.33	0.51	1,873.95	21.65	0.52	1.30	1.32	8.61	8.49	4,468.16	2.00
SPSW2-LY4	2,143.44	17.75	0.42	2,107.49	17.81	0.42	1.30	1.32	10.35	10.32	5,158.13	2.31
SPSW3-LY6	2,687.10	16.27	0.39	2,628.36	15.91	0.38	1.29	1.30	11.29	11.55	6,897.50	3.09
SPSW4-CS3	2,390.94	24.90	0.59	2,347.94	24.45	0.58	1.23	1.25	7.38	7.52	4,881.35	2.19
SPSW5-LY6-O	2,202.39	24.39	0.58	2,175.80	24.13	0.57	1.24	1.25	7.53	7.62	5,991.04	2.68

LY6가 Table 3에 나타난 바와 같이 최대강도와 초기강성이 가장 높았기 때문에 누적에너지흡수능력이 다른 실험체에 비해 가장 높았다. 가새골조와 강판전단벽에 중앙 개구부를 갖는 SPSW5-LY6-O는 최대강도와 초기강성은 개구부가 없는 강판전단벽골조(SPSW2-LY4와 SPSW4-CS3)보다 낮았지만, SPSW1-LY3보다 높았고, 누적에너지흡수능력은 높은 것으로 확인되었다. 이는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 가새골조와 SPSW5-LY6-O는 각 사이클에서 항복 이후 2차 강성이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한, 개구부가 없고 6 mm보다 얇은 강판전단벽골조(SPSW1-LY3과 SPSW2-LY4와 SPSW4-CS3)는 항복 이후 강판전단벽 내부에서 면외 변형이 발생하여 최대변위비 도달 전까지 강성저하 및 일시적인 내력저하가 발생하여 누적에너지흡수능력이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

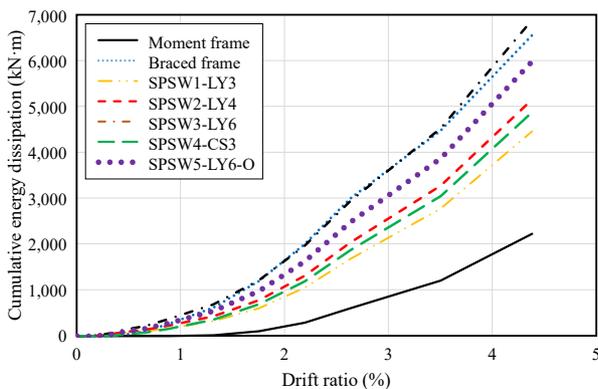


Fig. 12. Comparison of energy dissipation capacity

3.5 강성저하(stiffness degradation)

골조해석모델이 탄성소성 단계로 들어간 후 변위가 증가함에 따라 강성이 점차 저하되며, 이러한 강성저하 특성은 구조의 누적손상을 반영한다. 해석모델의 2차 강성은 할선강성(secant stiffness) K_{si} 로 나타낼 수 있다. 할선강성 K_{si} 는 다음 식 (4)를 이용하여 산정한다^{[15],[16]}.

$$K_{si} = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\delta_i| + |-\delta_i|} \quad (4)$$

여기서, K_{si} 는 할선강성(2차강성), $+P_i$ 는 i 사이클 정방향의 최대하중, $-P_i$ 는 i 사이클 부방향의 최대하중, $+\delta_i$ 는 i 사이클 정방향의 최대변위, $-\delta_i$ 는 i 사이클 부방향의 최대변위이다.

Fig. 13은 각 골조의 해석결과로부터 추출된 할선강성과 횡변위(drift ratio)와의 관계를 나타낸다. 가새골조 및 강판전단벽 골조의 해석모델은 전체 횡변위가 증가함에 따라 2차강성인 할선강성은 점차 감소하였으며, 초기에는 할선강성의 감소 정도가 급속하게 나타났고 횡변위가 1 % 이후에는 강성저하 정도가 완만하게 나타났다. 모멘트골조의 경우는 별도의 횡력저항 시스템이 없어 가력 초기부터 강성이 낮았고 강판전단벽이 6 mm로 가장 두꺼운 SPSW3-LY6가 할선강성이 전 구간에 대해 높았다. 가새골조는 초기에는 할선강성이 낮았지만 횡변위가 증가함에 따라 SPSW3-LY6를 제외한 강판전단벽 골조보다 할선강성이 높았고, 4.4 절에서 언급한 바와 같이 항복 이후 누적손상이 작아 누적에너지흡수능력이 큰 것으로 판단된다.

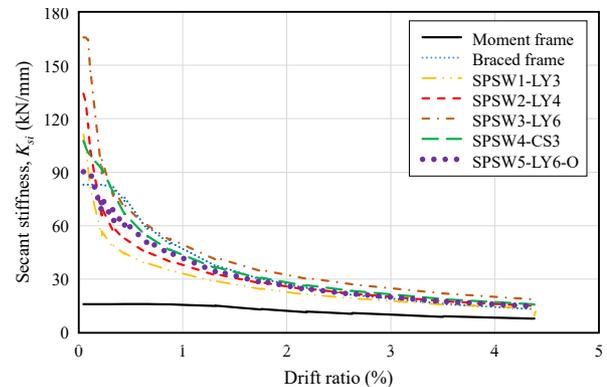


Fig. 13. Stiffness degradation curves of specimens

4. 결론

이 연구에서는 저항복강(HSA80) 강판전단벽으로 보강한 3층 골조의 구조 및 내진성능을 파악하고 비교하기 위하여 실험수행 전에 기존 연구의 재료데이터를 활용하여 유한요소해석모델을 구축하였고 비선형 반복해석을 수행하였다. 이 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 저항복강(HSA80)을 적용한 강판전단벽 골조해석모델은 일반구조용 압연강재 SS275가 전반적으로 항복한 이후 강도가 지속적으로 유지되는 안정적인 이력거동을 보였다.
- (2) 두께변수가 3 mm, 4 mm, 6 mm인 저항복강 HSA80을 적용한 강판전단벽 해석에서, 강판전

단벽 두께가 구조 안정성에 뚜렷하게 영향을 미치는 것을 확인하였다. 6 mm 두께 HSA80인 SPSW3-LY6는 가새골조(BF)보다 최대강도와 초기강성은 각각 1.24배, 1.99배 높게 나타났고 에너지흡수능력은 유사하게 나타났다. HSA80의 항복강도가 SS275의 1/3 수준에 불구함에도 4 mm 두께 HSA80 강판전단벽 골조인 SPSW2-LY4는 3 mm 두께 SS275 강판전단벽 골조인 SPSW4-CS3와 유사한 수준의 강도와 에너지소산능력을 보였다. 연성과 초기강성의 경우 각각 39%, 25%로 SPSW2-LY4가 높았다. 동일두께인 3 mm에 대해서 SPSW1-LY3 골조의 항복강도는 SPSW4-CS3의 80% 정도였으나, HSA80의 높은 재료의 연성능력으로 에너지흡수능력은 92%로 재료강도 차이에 비해 골조의 에너지흡수능력은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

- (3) 강판중간부 개구골조 SPSW5-LY6-O는 개구부가 없는 6 mm 강판전단벽 SPSW3-LY6에 비해 초기 강성, 강도, 및 에너지소산량이 모두 감소하였지만, 최대강도는 SPSW2-LY4와 유사한 값을 나타냈고, 에너지흡수능력은 가새골조(BF)와 유사한 값을 나타냈으며, 목적에 따라 강판전단벽에 개구부를 설치할 수 있음을 확인하였다.

이 연구에서 수립한 유한해석모델은 실험 용접 상세, 손상재료모델 등을 고려하지 않았기 때문에 내력 저항은 관찰되지 않았다. 추후, 강판전단벽골조의 재료 시험 및 반복가력실험을 토대로 해석모델의 타당성을 검증하고 용접상세, 반복경화 및 손상재료모델을 고려한 해석모델을 제시할 필요가 있다.

참고문헌(References)

[1] Choi, I.-R., and Park, H.-G. (2010) Hysteresis Model of Thin Infill Plate for Cyclic Nonlinear Analysis of Steel Plate Shear Walls, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.136, No.11, pp.1423-1434.

[2] Azandariani, M.G., Gholhaki, M., and Kafi, M.A. (2020) Experimental and Numerical Investigation of Low-Yield-Strength (LYS) Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Loading, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.203, 109866.

[3] Khan, N.A., and Srivastava, G. (2020) Models for Strength and Stiffness of Steel Plate Shear Walls with Openings, *Structures*, Elsevier, Vol.27, pp.2096-2113.

[4] Ryu, H.-S., Choi, K.-Y., Kim, Y.-J., Kim, H.-J., and Oh, S.-H. (2021) The Characteristics and Application Technology of Low Yield Point Steel HSA80, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.8-14 (in Korean).

[5] Kim, D.H., Alemayehu, R.W., Ju, Y.K., and Oh, J. (2022) Finite Element Parametric Study of Reduced Length Buckling Restrained Brace Using Low Yield Point Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.5, pp.259-267 (in Korean).

[6] Choi, I.-R., and Park, H.-G. (2008) Ductility and Energy Dissipation Capacity of Shear-Dominated Steel Plate Walls, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.134, No.9, pp.1495-1507.

[7] Park, H.G., Kwack, J.H., Jeon, S.W., and Kim, W.K. (2004) Framed Steel Plate Wall Subject to Cyclic Lateral Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.6, pp.781-792 (in Korean).

[8] Choi, I.-R., and Park, H.-G. (2009) Steel Plate Shear Walls with Various Infill Plate Designs, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.135, No.7, pp.785-796.

[9] Wang, M., Guo, Y., and Yang, L. (2021) Damage Indices and Fragility Assessment of Coupled Low-Yield-Point Steel Plate Shear Walls, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.42, 103010.

[10] Du, Y., Shao, Y., and Cao, Y. (2022) Performance of Repaired Steel Plate Shear Wall with Earthquake-Induced Damage, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.190, 107149.

[11] Krawinkler, H. (1992) *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*, ATC-24 Report, Applied Technology Council, USA.

[12] Shin, D.-H., and Kim, H.-J. (2022) Comparative Investigation on Structural Behaviors of Two-Side Clamped Thin Plates Made of Low-Yield Point Steel, *International Journal of Civil Engineering*, KSSC, Vol.20, No.8, pp.919-939.

[13] Ghafar, W.A., Zhong, T., Abid, M., Faizan, E.,

- Mohamed, A., and Yosri, A.M. (2022) Seismic Performance Investigation of an Innovative Steel Shear Wall with Semi-Rigid Beam-to-Column Connections, *Frontiers in Materials*, Frontiers Media, Vol.9, 1075300.
- [14] Li, Z., Ge, L., Qi, Y., Geng, Y., and Teng, J. (2021) Design and Experimental Study of a Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall with Novel Buckling-Restrained Panels for Improving Bearing Capacity and Energy Dissipation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.244, 112812.
- [15] Tan, J.-K., Su, M.-N., Wang, Y.-H., Wang, K., Cao, Y.-Q., and Li, P. (2022) Experimental Study on Cyclic Shear Performance of Steel Plate Shear Wall with Different Buckling Restraints, *Structures*, Elsevier, Vol.35, pp.469-482.
- [16] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (2015) *Specification for Seismic Test of Buildings* (JGJ/T 101-2015), China.
- [17] Shin, D.-H., and Kim, H.-J. (2022) Post-Buckling Strengths of Steel-Plate Shear Walls with Two-Side Clamped Boundary Conditions, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.170, 108499.

요약: 이 연구는 실험수행 전에 반복하중을 받는 저항복강(HSA80) 강판전단벽에 대한 성능을 평가하기 위하여 유한요소해석을 통해 강판전단벽골조, 중간부개구골조, 모멘트저항골조 및 가새골조와 구조거동을 비교하고, 내진성능을 평가하였다. 대상 골조는 1경간 3층 골조이며, 강판전단벽 골조 모델 4개와 중간부개구골조 1개, 모멘트저항골조 1개, 가새골조 1개 등 총 7개로 계획하였다. 강판전단벽 골조에 대한 유한요소해석모델은 볼트접합부와 같은 국부적인 상세를 제외하고 구축하였다. 해석 결과, 기존의 모멘트저항골조 및 가새골조에 비해 저항복강 강판전단벽골조는 높은 강도뿐만 아니라 높은 연성 및 에너지소산능력을 나타내었다.

핵심용어: 강판전단벽, 저항복강, 반복하중, 에너지소산능력, 유한요소해석
