

강판전단벽의 구멍형상과 위치에 따른 골조의 구조거동에 관한 해석적 연구

황호준¹ · 황보경² · 유홍식³ · 김영주⁴ · 김태수^{5*}

¹석사과정, 한양대학교, 건축시스템공학과, ²박사후연구원, 한양대학교 에리카, 인공지능 건설기술 연구센터,
³공학박사/수석연구원, 포스코 철강솔루션연구소, ⁴대표, 한국건축구조연구원, ⁵교수, 한양대학교 에리카, 건축학부

Numerical Study on Structural Behaviors of Steel Plate Shear Wall Frames with Different Hole Shapes and Locations

Hwang, HoJun¹, Hwang, BoKyung², Ryu, HongSik³, Kim, YoungJu⁴, Kim, TaeSoo^{5*}

¹Graduate Student(Master Course), Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 15587, Korea

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

³Researcher, Technical Research Laboratory Steel Structure Research Group, 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 – In this study, a finite element(FE) analysis was conducted to compare the hysteretic behavior of steel plate shear walls (SPSWs) with and without openings, including central and side openings, as well as varying shapes and positions of the openings. The target models consisted of a single-span, three-story frame steel structure, and a total of six models were planned. According to the FE analysis results, the SPSW frame with a central opening equal to one-third of the total width showed strength, initial stiffness, and energy absorption capacity that were 75 %, 72 %, and 74 %, respectively, compared to the SPSW without openings. In the case of the SPSW with side openings on both sides, these values were 87 %, 90 %, and 97 %, respectively. The complex model with openings placed alternately in the center and at the ends exhibited strength, initial stiffness, and energy absorption capacity 10 %, 33 %, and 20 % higher than those of the SPSW without openings. This improvement was attributed to the mitigation of stress concentration in the steel plates and sufficient plastic deformation in the beams.

Keywords – Steel plate shear wall, Finite element analysis, Ductility, Energy dissipation capacity, Opening shape, Opening location

1. 서론

최근 국내의 지진 발생빈도가 증가하고 건축물이 초고층화되는 추세에 따라 횡력저항시스템에 대한 중요성은 증가되고 있다. 건축물의 횡력저항 구조시스템 중에서 철근콘크리트(RC) 구조는 RC전단벽구조를, 강구조에서는 철골 가새구조 또는 트러스구조를 사용하고 있다.

RC전단벽구조는 일반적으로 철근과 콘크리트로 구성되어 있어 건물의 자중이 증가하게 되고, 기초 및 지반에 대한 하중부하가 증가한다. 철골 가새골조는 강판전단벽에 비해 벽두께가 상대적으로 두꺼워져서 실내 공간의 감소와 위치의 제한이라는 문제점을 가진다. 하지만 강판전단벽골조 시스템을 사용하게 되면 콘크리트 전단벽과 가새골조에 비해서 공간 활용성, 자중감소에 대한 장점뿐만 아니라, 공기단축, 층간변위 제어 효율성, 품질제어 효율성에서 큰 장점을 가질 수 있다. 하지만 강판전단벽(Steel Plate Shear wall, 이하 SPSW) 골조시스템은 고가의 재료 단가, 공간의 폐쇄성, 설계 제약 등의 한계점이 있다.

기존 연구인 Khan and Srivastava^[1]은 1개층 골조를 대상으로 다양한 개구부를 적용한 SPSW 시스템의 비

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 09, 2024; revised October 30, 2024; approved on November 07, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-400-5131

E-mail. tskim0709@hanyang.ac.kr

탄성 거동을 평가하였다. 그 결과, 강판 개구부의 크기와 위치는 SPSW 시스템에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. Deylami and Daftari^[2]은 50개 이상의 강판두께, 각 층에 동일한 개구부형상과 개구부 크기의 비율을 변수로 적용해 영향력 높은 변수를 비교하는 구조거동 평가를 수행하였다. 해석 결과, 개구부 크기의 비율에 의존하지 않고 강판의 두께와 개구부형상에 의존적인 것을 확인하였다. Sabouri-Ghomi *et al.*^[3]은 1개층 골조를 대상으로 사각형 개구부를 적용한 SPSW 시스템의 강도와 강성저하를 평가하기 위하여 해석적 연구를 진행하였다. 그 결과, 중간 개구부 해석모델의 소산 에너지가 가장 작게 나왔고 강도와 강성은 주로 개구부의 위치에 영향을 가장 많이 받는 것을 확인하였다. 이외에도 Jo *et al.*^[4]은 병렬 강판전단벽 시스템에서 보와 커플링 보 사이의 접합방법을 변수로 강판전단벽 시스템의 내진성능을 평가하였다. 1개층 골조의 강판전단벽의 형상비, 커플링 보의 길이 등을 변수로 다양한 실험을 진행하였다.

이 연구에서는 강판전단벽과 관련된 기존 연구와 차별적으로 아파트 리모델링용을 기준으로 계획한 층고 저감형 비대칭 보 및 기둥 단면 골조^[5]를 적용해 강판전단벽골조 시스템과 개구부와 구멍형상 변수를 적용한 강판전단벽골조 시스템의 구조성능을 유한요소해석적 방법을 통하여 분석하고 비교하는 것을 목적으로 한다. 또한, 각층에 다른 변수를 적용한 해석모델을 비교하여 각 층에 최적의 모델을 구하는 구조해석을 수행한다.

2. 골조 및 강판전단벽 구성 계획

강판전단벽 골조 및 비교 해석모델의 구조거동을 비교하기 위해 기존 연구^[5]를 참조하여 다음과 같이 해석 모델을 계획하였다. 해석모델의 골조는 1경간 3층 1/2 축소모델로 계획하였고 기둥과 보의 재료로는 용접구조용압연강재 SM355를 적용하였다^{[5]-[7]}. Fig. 1(a)과 같이 기둥 단면은 □-250×250×20이다. 보 단면의 경우는 콘크리트 슬래브 내에 매입되어 층고 저감과 구조성능을 확보하기 위해 계획했고, Fig. 1(b)와 같이 2층과 3층 보는 비대칭 용접 H형강 PH-150×250×150×12×25×15로 선정하였다. Fig. 1(c)와 같이 최상부 보는 최상부 가력 시 강성확보를 위해 높은 휨강성을 갖는 H형강

PH-150×250×15×25로 하였고, Fig. 1(d)에 1층의 최하부 보는 2층과 3층 보와 동일한 비대칭 단면이지만 하부면 경계 조건과 보 웨브의 국부좌굴을 방지하기 위해 보 웨브두께를 증가시킨 비대칭 H형강 PH-150×250×150×15×25×25로 선정하였다. 연구의 주요변수는 Table 1에 정리하고 골조 해석모델의 구성과 치수를 Fig. 2에 나타냈다.

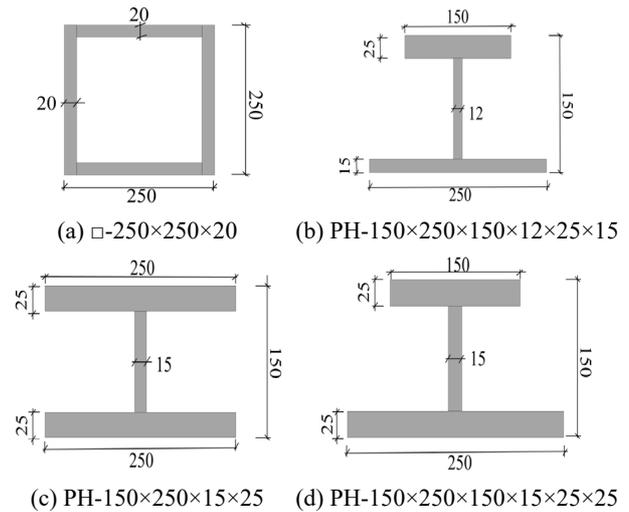


Fig. 1. Shape and geometry of column and beam (Unit: mm)

해석모델은 기본 강판전단벽골조를 SPSW-O(Steel Plate Shear Wall Original), 강판 중간부 개구부를 갖는 골조를 SPSW-CO(Center opening), 양측면 개구부 강판을 갖는 골조를 SPSW-SO(Side opening), 구멍형상의 강판을 갖는 골조를 SPSW-QCH(Quarter circle hole) 및 각 형상 변수를 조합한 강판을 갖는 골조를 SPSW-C-1(Complex-1)와 SPSW-C-2(Complex-2)로 구성하였다. 해석모델은 공통적으로 강판부분은 일반구조용압연강재인 SS275의 평판두께 3 mm를 사용하였

Table 1. List of specimens

Specimen	Steel plate material	Thickness <i>t</i> (mm)	Parameter
SPSW-O	SS275	3	No opening (Original)
SPSW-CO			Center opening
SPSW-SO			Side opening
SPSW-QCH			Opening shape
SPSW-C-1			Complex
SPSW-C-2			Complex

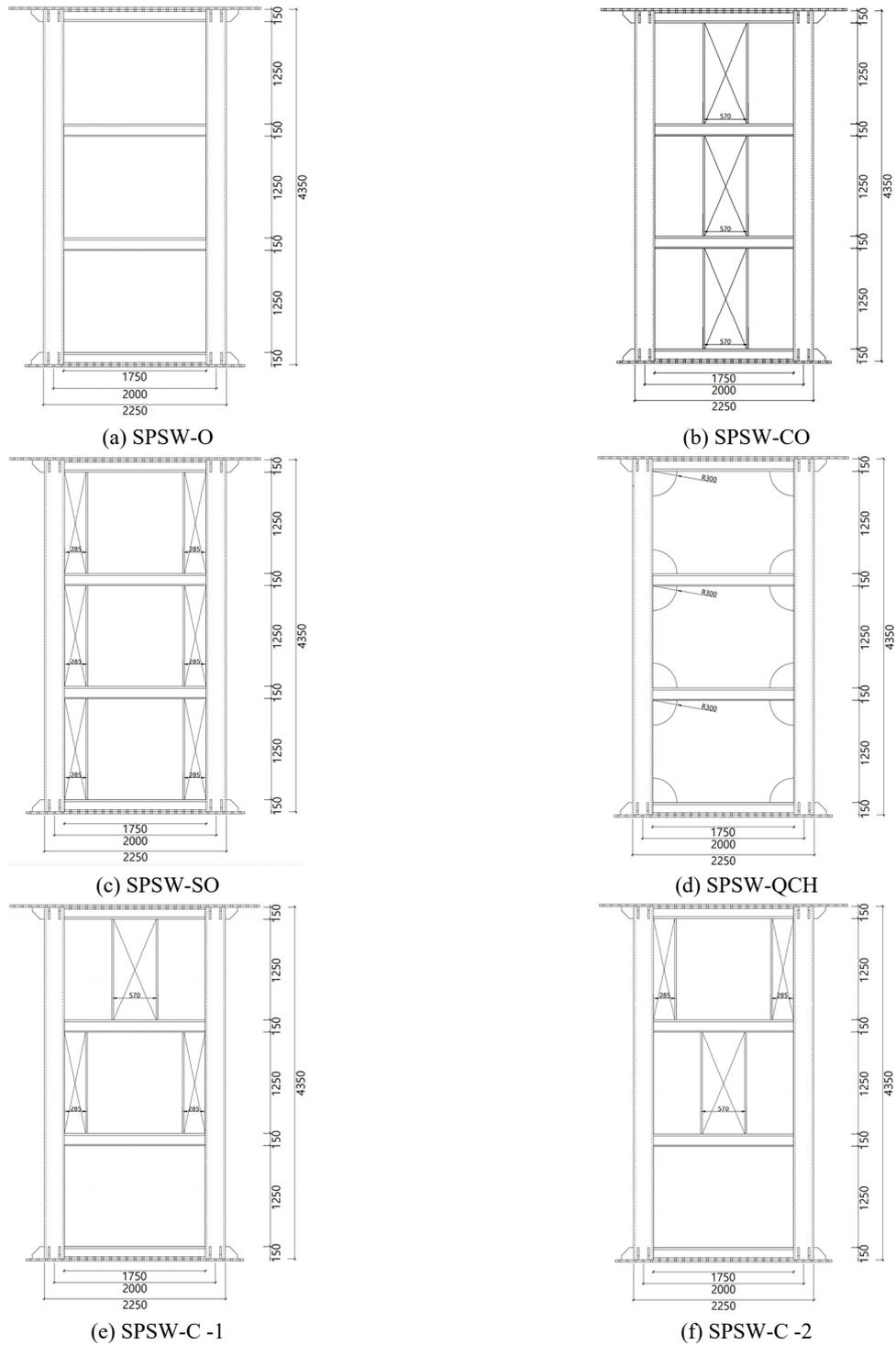


Fig. 2. Shape and geometry of specimens (Unit : mm)

고 골조 1개층의 상하 보 중심 간 높이는 1,750 mm, 좌우 기둥 중심 간 길이는 1,250 mm로 설정하였다. SPSW-CO 모델은 강판중앙에 개구부가 있는 경우를 비교하기 위해서 계획하였다.

개구부는 중앙부에 폭 570 mm의 크기로 설정하였다. SPSW-SO 모델은 개구부의 위치에 따른 구조거동을 비교하기 위해서 계획하였다. SPSW-QCH 모델은 개구형상에 따른 해석모델의 구조거동을 분석하기 위

해서 구멍형상을 적용해 계획하였다. SPSW-C-1 모델은 1층에는 Original, 2층에는 Side opening, 3층에는 Center opening 해석모델의 변수를 적용한 복합모델이다. 각 층에 다른 변수를 적용했을 때 단일변수를 가지는 해석모델과 구조거동을 비교하기 위해서 계획하였다. SPSW-C-2 해석모델은 1층에는 Side opening, 2층에는 Original, 3층에는 Center opening 해석모델의 변수를 적용한 복합모델이다. SPSW-CO, SO, C-1, C-2은 개구부 주위를 평판두께 20 mm 스티프너로 보강한다. 건축계획적 측면에서 개구부 위치가 층별로 상이할 가능성이 있고 동일한 위치에 개구부가 형성될 수 없을 경우를 고려하여 복합모델을 설정하였다.

3. 유한요소해석 모델

3.1 해석모델링

반복하중을 받는 구조해석모델의 이력거동을 고찰하기 위해 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS^[8]를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석시간을 단축하기 위하여 솔리드 요소가 아닌 기존연구^[5]에서 채택한 셸(Shell) 요소를 적용하였다. Fig. 3에는 경계 및 하중조건과 L0, L1 및 L2 각층의 횡변위를 측정할 지점을 나타냈다.

골조의 용접부분인 기둥, 보, 박판, 보플랜지 보강 스티프너인 LHS(Lengthened horizontal stiffeners) 및 리브플레이트는 ‘Merge’ 기능을 사용하여 병합하였다. 이를 제외한 모든 요소는 ‘Tie’기능을 사용하여 연결하여 모델링하였다. 해석모델의 최상부 보의 중심에 Reference point 기능을 사용하여 참조점(RP)을 생성한 뒤 윗면과 절점을 ‘Tie’로 구속하였다. 바닥 판 및 골조 자중에 의한 영향을 고려하기 위해 기둥의 항복내력의 10%에 해당하는 축력(719.3 kN)을 기둥 개수만큼 2배(1,438.6 kN) 하여 Y축 방향(중력방향)으로 기둥 사이에 있는 RP에 입력하였다.

최상층의 RP에 X축과 Y축변위는 고정하고 Z방향의 변위제어 방법으로 1회 씩 반복가력하였고 골조하부는 고정단 ($U_x, U_y, U_z = 0$)으로 설정하였다. 가력계획은 ATC-24의 ‘Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures’^[9]에 따라 Fig. 4와 같이 설정하였다. 해석모델 총 높이 4,350 mm를 기준으로

층간변위비(Drift ratio)를 정의하여 반복가력을 수행하였다. Fig. 3에서 우측방향 가력을 ‘+(Positive)’, 좌측방향 가력을 ‘-(Negative)’로 가력프로토콜을 계획하였다.

강판의 제작 및 시공오차로 인한 해석모델의 구조거동에 미치는 영향을 반영하기 위하여 강판전단벽 한 변 길이의 1/1,000을 초기변형(Initial imperfection)으로 하여 해석모델에 입력해 좌굴해석을 수행하였다. 면외 방향으로 발생한 1차 좌굴모드 형상을 초기 불안전성으로 고려하였다^[10]. 1차로 탄성좌굴해석을 수행하여 전체와 국부좌굴모드를 확인하고 이를 통해 얻은 고유치를 이용하여 비선형 준정적 2차 해석을 수행하였다. 강판의 좌굴과 하중이 제하(Unloading)후 가력방향이 바뀌어 재하(Reloading)시에 발생하는 스냅-스루

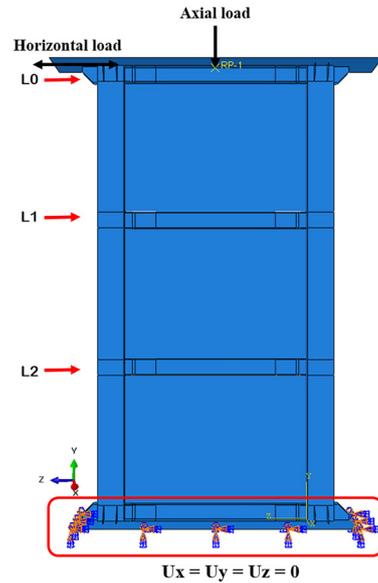


Fig. 3. Numerical model of SPSW-O

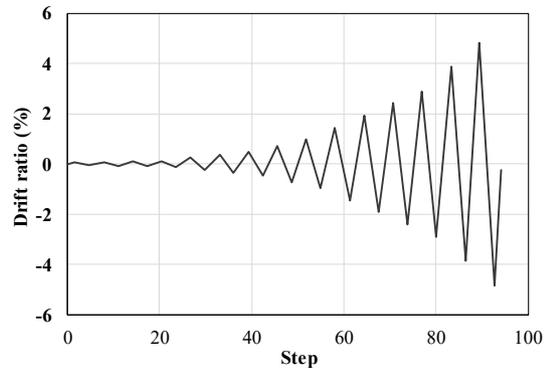


Fig. 4. Loading protocol

(Snap-through)현상을 고려하기 위해 외연적 적분법 (Explicit integration method)을 활용하여 준정적 해석 (Quasi-static analysis)을 적용하였다.

3.2 재료모델

골조해석모델에 사용된 강종의 재료 데이터는 기존 연구인 Shin and Kim^[11]의 재료시험결과를 참조하였다. 강재의 항복강도 및 인장강도를 Table 2에 정리하였다. 미세스 항복조건 및 등방경화법칙이 적용되는 탄소성 재료모델을 적용하였다. 인장시험 결과로부터 얻어진 강재의 공칭응력-공칭변형률 선도(Nominal

Table 2. Mechanical properties of materials (Shin and Kim^[11])

Steel grade	Elastic modulus E (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_u (MPa)	Elongation at fracture EL (%)
SM355-20T	194,305	390.95	530.90	27.28
SM355-25T	201,233	358.52	523.01	27.82
SS275	205,095	293.45	423.18	34.76

stress-strain curve: $\sigma_n - \epsilon_n$)를 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 시편의 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 변

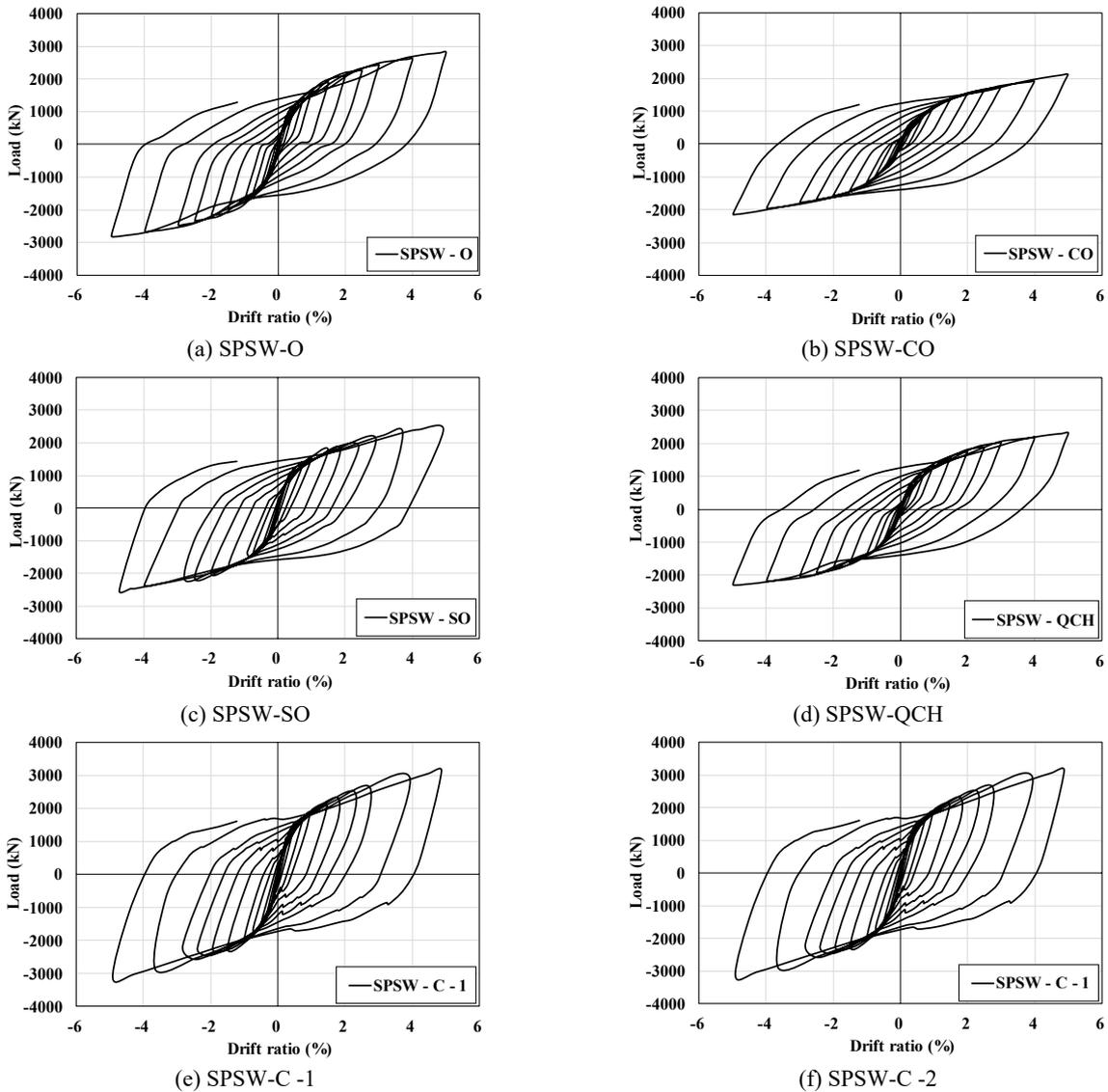


Fig. 5. Load-drift ratio curve of specimens

Table 3. Analysis results

Specimen	Maximum strength P_{ua} (kN)				Initial stiffness K_1 (kN/mm)			
	Positive(+)	Negative(-)	$P_{ua}^+ / P_{ua,o}^+$	$P_{ua}^- / P_{ua,o}^-$	Positive(+)	Negative(-)	$K_1^+ / K_{1,o}^+$	$K_1^- / K_{1,o}^-$
SPSW-O	2819.13	2832.27	1.00	1.00	86.53	86.53	1.00	1.00
SPSW-CO	2123.23	2136.27	0.75	0.75	61.83	63.23	0.71	0.73
SPSW-SO	2408.87	2508.68	0.85	0.89	77.41	77.85	0.89	0.90
SPSW-QCH	2318.00	2320.90	0.82	0.82	64.72	63.68	0.75	0.74
SPSW-C-1	3114.79	3152.90	1.10	1.13	116.31	117.09	1.34	1.35
SPSW-C-2	3022.37	3056.08	1.07	1.08	114.04	115.35	1.32	1.33

형률(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.

4. 해석결과

4.1 하중-변위 관계

해석결과를 Fig. 5와 같이 하중-층간변위비(Drift ratio) 관계로 나타내었다. 각 해석모델의 최대내력(P_{ua}^+, P_{ua}^-)과 초기강성(K_1^+, K_1^-)은 Table 3에 정리하였다. 초기강성은 포락곡선에서 해석 첫 사이클의 기울기로부터 산정하였다. 각 해석모델은 부 방향 변위비 5.0 %에서 최대 하중에 도달하였다. 강판전단벽 골조시스템 SPSW-O는 개구부 및 구멍형상을 갖는 시스템에 비해 동일변위 기준 최대내력과 초기강성이 높게 나타났고, 복합모델인 SPSW-C-1과 SPSW-C-2는 SPSW-O보다 높은 최대내력과 초기강성을 나타냈다. 최대강도와 초기강성을 해석 모델별로 비교하기 위하여 기본모델인 SPSW-O의 최대내력($P_{ua,o}$)과 초기강성($K_{1,o}$)을 기준으로 최대내력비($P_{ua} / P_{ua,o}$) 및 초기강성비($K_1 / K_{1,o}$)를 산정하였다. 최대강도비($P_{ua} / P_{ua,o}$)는 0.75~1.10 범위로 나타났고 초

기강성비($K_1 / K_{1,o}$)는 0.71~1.35 범위로 SPSW-C-1 모델이 가장 높았다. Table 3에서 알 수 있듯이 최대강도와 초기강성은 SPSW-C-1, SPSW-C-2, SPSW-O, SPSW-SO, SPSW-QCH, SPSW-CO 크기순으로 나타났다. 이 결과로부터 3층 골조시스템에서 각 층에 다른 개구형상의 강판을 적용하였을 때 최대내력과 초기강성이 높게 나타나는 것을 확인하였다.

4.2 포락곡선

Fig. 5에서 각 하중단계에서의 최대강도를 연결하여 포락곡선(Skeleton curve)을 구하였다. Fig. 6에서 각 해석모델의 해석결과로부터 얻은 포락곡선을 비교하였다. 각 해석모델의 곡선에서 뚜렷한 항복점이 관찰되지 않았으며 항복 이후 소성영역에서 변위가 증가함에 따라 강성이 감소하였고 결과는 해석모델별로 감소 정도가 상이했다^[10].

항복점에서의 항복변위(δ_{ya})와 항복내력(P_{ya})은 Fig. 7과 같이 포락곡선으로 둘러싸인 부분의 면적 ①과 면적 ②가 같게 되도록 등가에너지 방법으로 정의하였다^[10]. 각

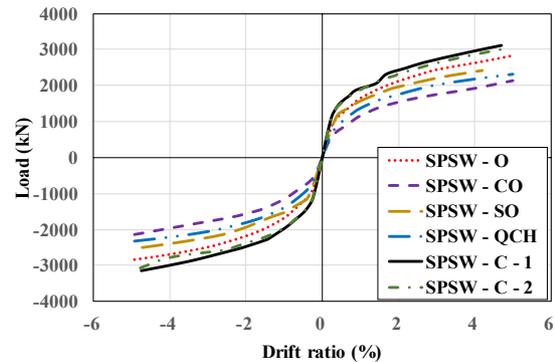


Fig. 6. Skeleton curve of the specimens

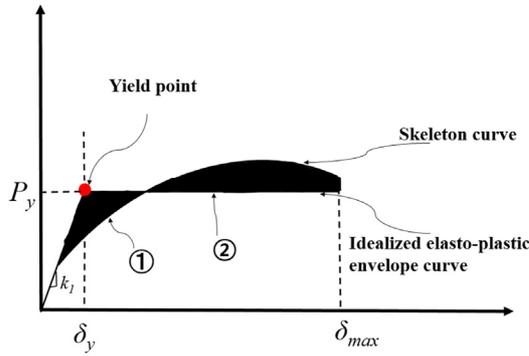


Fig. 7. Definition of yield point

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.

SPSW-O 모델은 전반적으로 개구부 및 구멍형상을 적용한 해석모델보다 높은 항복강도를 나타내었다. SPSW-O의 항복강도와 비교하였을 때 SPSW-CO, SPSW-SO, SPSW-QCH은 각각 28%, 11%, 17% 낮게 나타났다. 그러나, SPSW-C-1과 SPSW-C-2는 각각 11%, 6% 항복강도가 증가했다. 같은 개구부를 적용한 모델임에도 불구하고 각 층의 개구형상을 다르게 적용했을 때 항복강도는 증가하였다.

4.3 에너지소산능력

누적에너지소산능력(Cumulative Energy Dissipation, CED)은 동일목표 층간변위비(Drift ratio)에 대해 Fig. 5의 각 사이클의 이력곡선에 둘러싸인 면적을 누적 합산한 에너지소산능력을 나타낸다^{[6],[11],[12]}. Fig. 8은 각 사

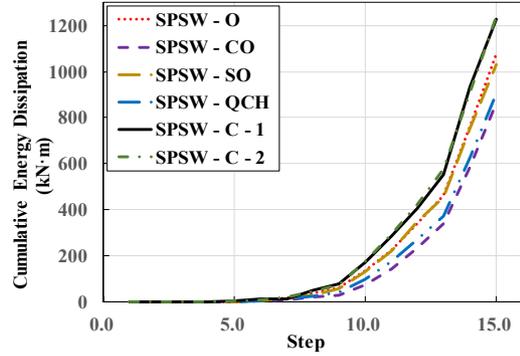


Fig. 8. Comparison of cumulative energy dissipation capacity

이클의 누적에너지를 비교하기 위해서 전체 사이클의 소산에너지를 누적 합산한 것이 아닌 각 사이클별로 분리하여 합산한 에너지소산능력과 전체 층간변위비의 관계곡선이다. Table 4에서는 SPSW-O의 사이클 전체 누적에너지흡수능력(CED_0)을 기준으로 다른 모델과의 에너지흡수능력(CED/CED_0)을 비교하였다.

SPSW-C-1과 SPSW-C-2는 Table 3에 나타난 바와 같이 최대강도와 초기강성이 가장 높았기 때문에 누적에너지 흡수능력도 다른 해석모델에 비해 높았다. SPSW-O 해석 모델에 비해 SPSW-CO, SPSW-SO와 SPSW-QCH는 0.74-0.97배의 낮은 누적에너지흡수능력을 보였다. Table 3의 최대내력비($P_{ua}/P_{ua,0}$)와 Table 4의 (CED/CED_0)을 비교하면 SPSW-SO, SPSW-C-1 및 SPSW-C-2에 비하여 SPSW-O, SPSW-CO와 SPSW-QCH의 증가비율은 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 10을 보면 알 수 있듯이 강판전단벽골조 SPSW-O, 중간 개구부 SPSW-CO와 구멍형상 SPSW-QCH 해석모델이 항복이후 강판전단벽 내부에서 면외변형이 발생하여 최대변위비 도달 전까지 강성

Table 4. Analysis results

Specimen	Yield point						Strength ratio		Ductility		Cumulative energy dissipation CED (kNm)	CED ratio (CED/CED_0)
	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 (%)	Positive loading (+)	Negative loading (-)	Positive loading (+)	Negative loading (-)		
SPSW-O	2286.59	26.43	0.61	2237.60	25.86	0.59	1.23	1.27	7.94	8.00	3122.25	1.00
SPSW-CO	1639.87	26.52	0.61	1615.74	25.56	0.59	1.29	1.32	7.91	8.08	2300.60	0.74
SPSW-SO	2040.79	26.36	0.61	1972.26	25.34	0.58	1.18	1.27	7.85	7.83	3042.19	0.97
SPSW-QCH	1900.17	29.36	0.67	1876.11	29.46	0.68	1.22	1.24	7.14	7.01	2530.77	0.81
SPSW-C-1	2548.15	21.91	0.50	2485.57	21.22	0.49	1.22	1.27	9.34	9.75	3725.50	1.19
SPSW-C-2	2434.39	21.35	0.49	2423.03	21.01	0.48	1.24	1.26	9.30	9.53	3759.24	1.20

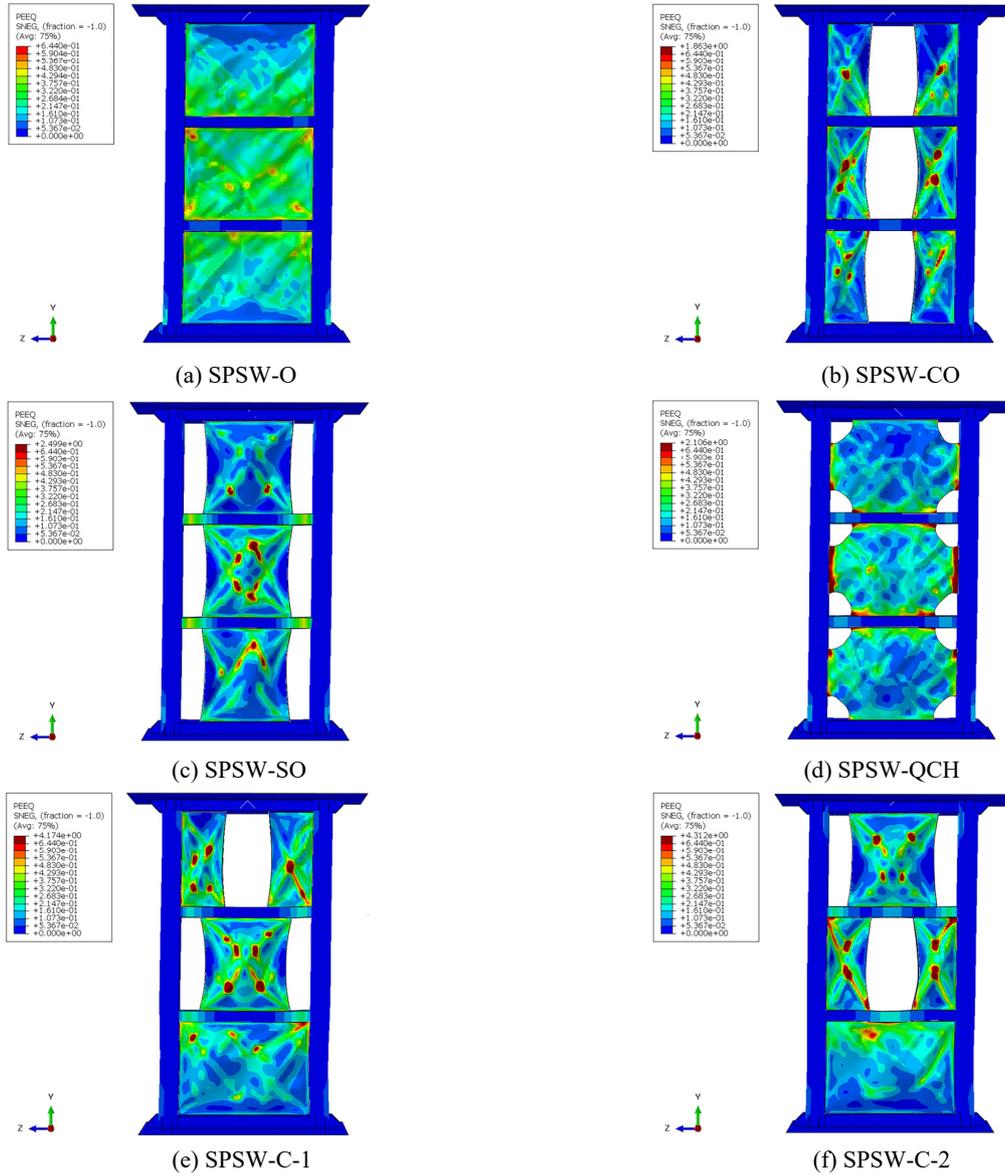


Fig. 9. PEEQ distributions at analysis end

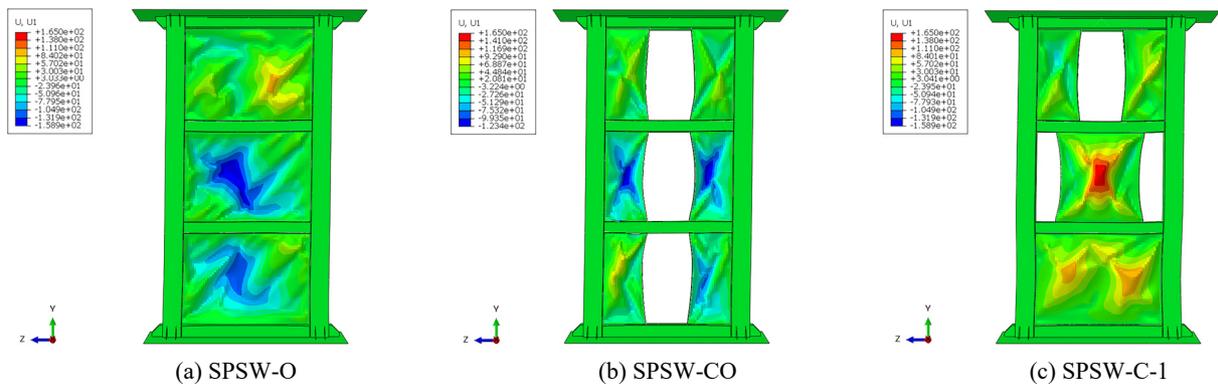


Fig. 10. Out-of-plane deformation at analysis end

저하 및 일시적인 강도저하가 발생하여 누적에너지흡수 능력이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

4.4 변형률분포

해석결과로 얻어지는 등가소성변형률(Equivalent plastic strain, PEEQ)은 재료의 비탄성변형 분포로부터 파단 및 손상가능 위치를 확인할 수 있는 스칼라 변수이다. Fig. 9에 해석 종료시점에서 각 해석모델의 등가소성변형률 분포를 정리하였다. 전체적으로 해석모델의 강판부분에선 인장응력장(Tension field)이 형성되었다. Figs. 9(b), 9(c), 9(d), 9(e) 및 9(f)에서 SPSW-CO, SPSW-SO, SPSW-QCH, SPSW-C-1과 SPSW-C-2모델의 PEEQ는 인장응력장이 형성되는 부분에 집중·분포하였다. SPSW-O 모델의 PEEQ는 강판과 기둥의 하단부에 집중적으로 분포되었다. Figs. 9(c), 9(e) 및 9(f)에서 SPSW-SO, SPSW-C-1과 SPSW-C-2의 PEEQ는 개구부가 형성된 부분의 골조에 집중되었다. 반면에 Fig. 9(b)의 SPSW-CO의 PEEQ는 강판에만 집중적으로 분포하는 것으로 나타났다.

4.5 강성저하

해석모델이 소성단계로 들어간 후 변위가 증가함에 따라 강성이 점차 저하되었으며, 이러한 강성저하(Stiffness degradation) 특성은 구조의 누적손상을 반영한다. 해석모델의 유효강성(Effective stiffness)을 K_{si} 로 나타낸다. 유효강성 K_{si} 는 식 (4)를 이용하여 산정한다^[13].

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

여기서, K_{si} 는 유효강성, $+P_i$ 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. 11은 해석모델의 해석결과로부터 추출된 유효강성과 층간변위비(Drift ratio)와의 관계를 나타낸다.

전체 횡변위가 증가함에 따라 유효강성은 점차 감소하였다. 초기에는 유효강성의 저하되는 추세가 급한 것으로 나타났고 횡변위 1% 이후에는 저하 정도가 완만

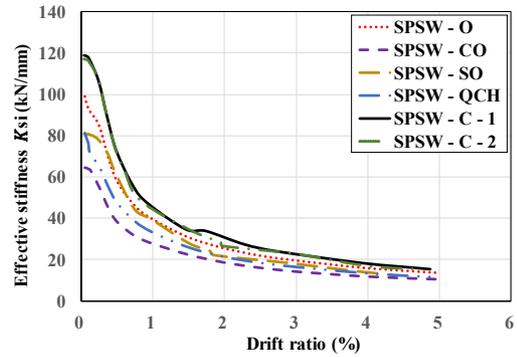


Fig. 11. Stiffness degradation curves of specimens

하게 나타났다.

SPSW-C-1과 SPSW-C-2의 유효강성이 전 구간에 대해 높았다. 양측면 개구부 모델인 SPSW-SO은 층간변위비 0.5% 부근에서 SPSW-O 모델보다 높아졌으나 층간변위비가 증가함에 따라 작아졌다. 이는 Fig. 8부터 알 수 있듯이 초기단계 사이클에서 SPSW-SO의 누적손상이 적어 누적에너지흡수능력이 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.6 미세스응력 및 초기강성

SPSW-C-1과 SPSW-C-2 모델의 초기강성은 SPSW-O 모델의 값보다 크게 나타났다. 응력이 집중이 예상되는 부재의 미세스(MISES) 응력을 이용해 강성 차이를 분석하고자 한다. Fig. 12는 해석모델의 해석결과로부터 각 스텝별 L2에서 측정된 층변위(Story drift)와의 관계를 나타낸다. Fig. 3에 설정한 참조점으로부터 확인한 횡변위에 대해 L0와 L1에서 측정된 상부층의 횡변위는 큰 차이는 없었지만, 저층 L2에서 측정된 횡변위는

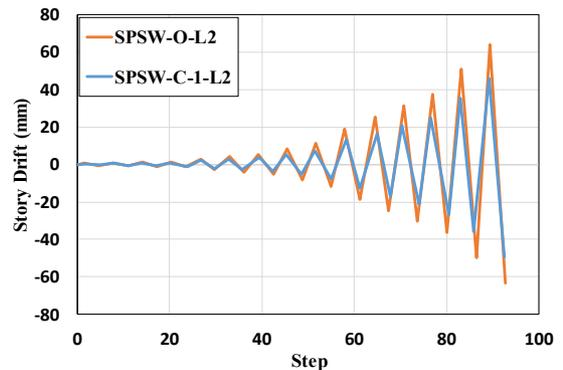


Fig. 12. Story drift comparison at LVDT (L2)

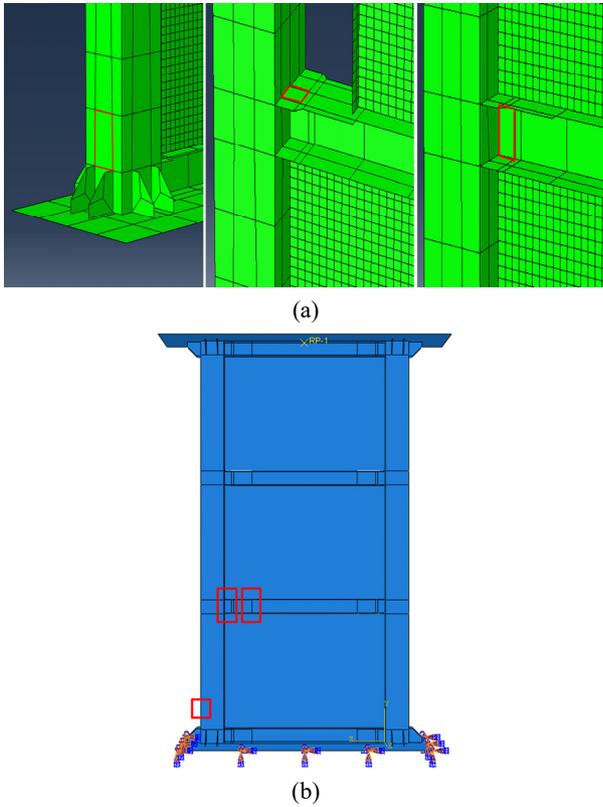


Fig. 13. Location of stress measurement

SPSW-C-1가 SPSW-O보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 응력분포에 대해서 저층을 중점으로 비교하였다. 그 결과, SPSW-O 모델은 기둥에 응력이 집중되었고, SPSW-C-1 모델은 보 부분에서 응력이 집중되는 것으로 나타났다. 이를 더 정밀하게 분석하기 위해서 응력이 집중되는 부분의 미세스(MISES) 응력을 확인하였다. Fig. 13은 횡변위 증가에 따른 미세스 응력을 확인하기 위한 위치를 나타낸다. 해석모델의 최대내력시점에서 SPSW-O와 SPSW-C-1 모델의 기둥부분에서 최대응력은 Fig. 14으로부터 각각 620.53 MPa, 581.95 MPa를 확인하였다. 보 부분에서의 응력은 플랜지와 웹을 구분하여 비교하였고 두 모델 모두 저층부인 L2에서 가장 응력이 높았다. 보 웹에서 SPSW-O와 SPSW-C-1의 미세스 응력은 각각 524.84 MPa, 621.61 MPa로, 보 플랜지에서는 SPSW-O와 SPSW-C-1의 응력은 각각 466.18 MPa, 596.63 MPa로 나타났다. 이는 골조에 횡하중에 가해졌을 때 SPSW-O보다 SPSW-C-1가 강판이나 기둥에 응력집중이 발생하여 조기에 파단되지 않고 개구부가 교차되는 보부분에 응력이 집중되어 충분한

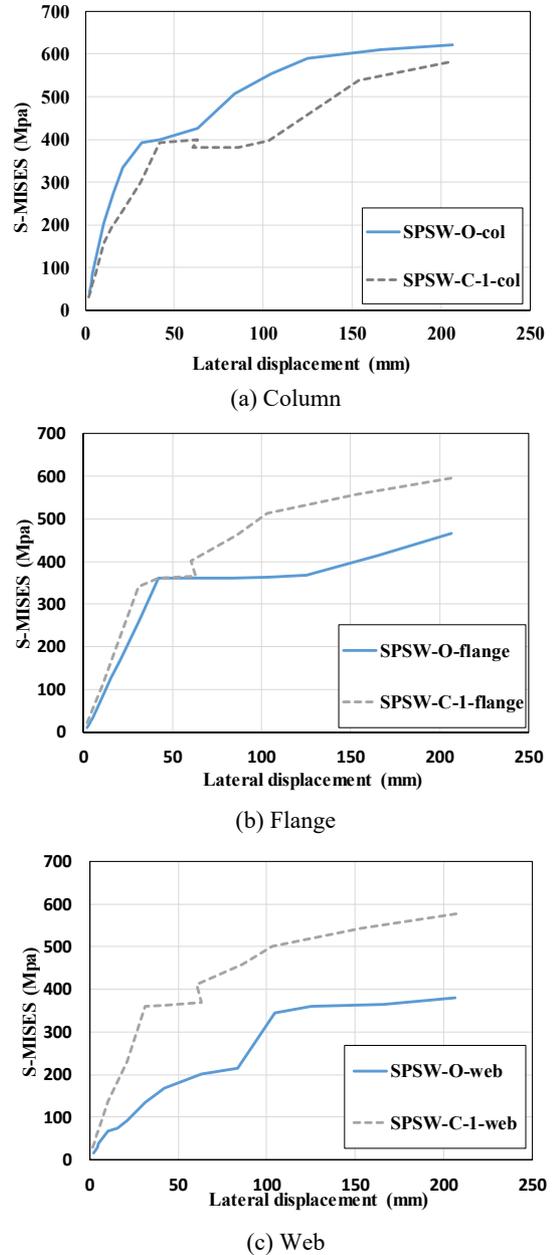


Fig. 14. MISES stress distribution

소성변형이 발생되었다. 그 결과로 SPSW-C-1의 최대 내력, 강성 및 에너지 흡수능력이 SPSW-O보다 높은 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 강판전단벽의 개구부 유무와 개구부 위치를 변수로 한 3층 골조의 구조성능을 분석하고 비

교하기 위하여 유한요소모델을 구축하여 비선형 반복 해석을 수행하였다. 이 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 강판전단벽 골조는 개구부 유무, 보강위치 및 형상에 따라 중앙 개구부를 갖는 SPSW-CO, 각 모서리에 개구부를 갖는 SPSW-QCH, 양측면 개구부가 있는 SPSW-SO, 개구부가 없는 SPSW-O, 개구부가 층별로 다르게 조합된 SPSW-C-1와 SPSW-C-2 모델 순으로 최대내력, 강성 및 에너지 흡수능력이 높게 나타났다.
- (2) 중간개구부, 양측면 개구부 및 모서리 개구부를 갖는 강판전단벽 골조는 개구부가 없는 강판전단벽골조의 에너지소산능력에 비해 각각 26 %, 2.6 %, 18.9 % 낮게 나타났다.
- (3) 중간개구부, 양측면 개구부 및 개구부가 없는 강판전단벽을 조합한 복합 강판전단벽 골조의 최대내력, 초기강성 및 에너지흡수능력은 개구부가 없는 강판전단벽 골조에 비해 각각 평균 10 %, 33 %, 20 % 높게 나타났다.
- (4) 강판전단벽의 소성영역이후 누적소성 에너지흡수능력에 영향을 미치는 유효강성에서도 복합 강판전단벽의 유효강성이 가장 높았다.
- (5) 각 골조시스템에 따라 1층 상부에서 측정한 횡변위를 비교했을 때 개구부가 없는 강판전단벽보다 복합 강판전단벽 골조가 응력집중이 개구부와 보로 분산되어 각 스텝에 따른 횡변위가 높게 나타났다. 기둥하부의 응력분포도 개구부가 없는 강판전단벽골조가 복합 강판전단벽 골조보다 높게 나타났지만, 보 플랜지와 웨브에서 관측된 응력은 개구부가 각 층별로 조합된 복합 강판전단벽 골조가 개구부가 없는 강판전단벽 골조보다 응력이 강판과 접합부에 집중되지 않고 보로 분산되어 충분한 소성변형이 발생하여 전체적으로 내력과 에너지흡수능력이 상승된 것으로 판단된다.

추후 강판전단벽의 개구부 위치 및 조합에 따른 실험적 연구를 통해 해석적 연구결과에 대한 확인할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 이공분야기초 연구지원사업(과제번호 No. RS-2024-00346347)의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌(References)

- [1] 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.
- [2] Deylami, A., and Daftari, H. (2000) Non-Linear Behavior of Steel Plate Shear Wall with Large Rectangular Opening, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, pp.1–7.
- [3] Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R., Alavi, M., Roufegarinejad, A., and Bradford, M.A. (2012) Stiffness and Strength Degradation of Steel Shear Walls Having an Arbitrarily-Located Opening, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.79, pp.91–100.
- [4] Jo, B.H, Oh, K.Y., Jang, D.H., and Lee, K.M. (2018) Seismic Performance Evaluation of 3-Bay Coupled Steel Plate Shear Wall on the Boundary Frame and Connection Type, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.5, pp.289–298 (in Korean).
- [5] Guo, Y., Hwang, B.K., Ryu, H.S., Kim, Y.J., and Kim, T.S. (2023) Numerical Study on Structural Behaviors of Low-Yield Point Steel Plate Shear Wall, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.335–345 (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*, ASCE, 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] Dassault Systemes (2023) *ABAQUS/CAE User's Manual (Ver. 6.23)*, Dassault Systemes.
- [9] Applied Technology Council (1992) *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel*

- Structures*, ATC-24, ATC, USA.
- [10] Wang, K., Su, M.-N., Wang, Y.-H., Tan, J.-K., Zhang, H.-B., and Guo, J. (2022) Behaviour of Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall with Concrete-Filled L-Shaped Built-Up Section Tube Composite Frame, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.50, 104217.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

요 약: 이 연구에서는 개구부가 없는 강판전단벽과 중앙개구부, 측면개구부 및 개구부형상과 위치에 따른 강판전단벽과의 이력거동을 비교하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 대상 모델은 1경간 3층 골조로 구성하고 총 6개의 모델을 계획하였다. 해석결과, 전체 폭의 1/3의 중앙 개구부를 갖는 강판전단벽 골조는 개구부가 없는 강판전단벽보다 내력, 강성 및 에너지 흡수능력은 각각 75 %, 72 %, 74 %로 나타났다. 양쪽 개구부를 갖는 강판전단벽 골조의 경우는 87 %, 90 %, 97 %로 나타났다. 개구부를 중앙과 단부에 교차로 배치한 복합모델의 내력, 초기강성 및 에너지 흡수능력은 개구부가 없는 강판전단벽 골조보다 강판의 응력집중이 완화되고 보에 충분한 소성변형으로 각각 10 %, 33 %, 20 % 높게 나타났다.

핵심용어: 강판전단벽, 유한요소해석, 연성, 에너지흡수능력, 개구부 형상, 개구부 위치
