

大韓建築學會論文集 2025. 3

JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Vol.41 No.3

www.aik.or.kr

計劃, 設計, 歷史·建築論, 都市·地域, 環境設備, 構造, 材料, 施工

제 41 권 제 3 호 (통권 437 호)

도시적 지속가능성 관점에서의 고가하부 공간 연구	김수미	3~14
지역건축안전센터의 업무실태 분석 및 업무 모니터링을 통한 운영모델 제안	김민지 · 유제연 · 이여경	15~26
복합건축물 이용자의 피난동선 인지에 따른 비상출구 선택의 관계 분석	공은미 · 김찬주	27~35
공공실버주택 거주자의 주거만족도에 관한 연구	김도연 · 최병숙 · 손능수	37~48
재난 임시주거 계획에 관한 법제 개선 연구	박연주 · 서 현	49~60
성수동 준공업지역 재생건축물의 용도 변화에 따른 저층부 특성에 관한 연구	고은경 · 강예린	61~72
서리풀악기거리 내 악기판매점의 분포 특성 연구	권은초 · 서 현	73~83
중국의 학교복합화 시설의 계획적 특징 연구	유혜연 · 김선아	85~92
영구임대주택단지 내 경로당의 유니버설디자인 적용 현황분석	박경민 · 이태경 · 김원지	93~101
모듈러 건축을 적용한 스마트경로당 표준모델 계획	유성은 · 오명원	103~112
의료시설 입지평가지표 개발에 관한 연구	이재홍 · 이재욱	113~124
초기 단계 유인 우주기지 건설을 위한 필요 모듈과 볼륨	양현정 · 엄예슬 · 백 진 · 정준수	125~134
알바루 시자가 설계한 포르투 건축학교의 비형식적 공간에서 나타나는 건축특성에 관한 연구	김종성	135~145
1970년대 잠실지구 종합개발계획의 변화 과정과 도시·건축 영역의 분화에 관한 연구	이보경 · 김성홍	147~158
개발시대 한국 건축의 '환경' 담론	이건일 · 백 진	159~170
김수근이 설계한 구 수도의과대학 부속병원 신축 병동(1963~65)의 건축적 맥락과 의미	김현섭	171~180
도심주거 공급 활성화를 위한 주차장 기준에 관한 연구	임재현 · 김도년	181~192
고령자의 지역사회 지속거주(AIP) 지원을 위한 환경계획방안	신성은 · 변기동 · 하미경	193~204
아이트래킹을 활용한 CPTED 시설 인지특성 및 범죄두려움 영향요인 분석 ..	오세진 · 채한희 · 이경환	205~214
저층주거지역 주민의 근린생활권 내 여가공간 이용 현황과 여가환경 인식에 관한 연구	이수현 · 변기동 · 하미경	215~226
도심 수변공간 활성화를 위한 제도 개선 방안 연구	김대운 · 최정윤	227~238
노후 단독주택 그린리모델링을 통한 에너지 저감 효과 연구	서효정 · 변나향	239~248
인구감소 및 지방소멸에 대응하는 공간전략의 방향과 과제	박성신	249~260
건물 재실자 요구사항 패널자료를 활용한 에너지량 결정요인 분석	김현창	261~268
건축물의 에너지절약설계기준 방습층 정의에 따른 경량목조건축물의 습기안정성	김민주 · 류현진 · 김석환	269~280
벽식 구조와 라멘 구조 프리캐스트 콘크리트 공동주택에서 싱글 패널 외벽과 샌드위치 패널 외벽 간 단열성능 비교	주나영 · 송승영	281~289
미세조류 배양 건축외피의 실내채광 조절성능 분석	최승주 · 한승훈	291~300
이코노마이저 외기 엔탈피 센서 오프셋 결함 발생에 따른 중간기 냉방 에너지 사용량 변화 및 실내 열환경 평가	김민호 · 장아민 · 도성록	301~308
스프링 댐퍼를 포함한 강봉 트러스 시스템으로 보강된 조적벽체의 면내 내진거동 평가	이혜지 · 양근혁	309~316
강-PC 합성형 모듈러 건축물의 비선형 내진성능 평가	박금성 · 오근영 · 이상섭	317~325
프리캐스트 경량골재 콘크리트 특수전단벽의 내진성능에 대한 V-타이와 강판 볼팅 공법의 영향평가	김윤정 · 임채림 · 문주현 · 양근혁	327~338
개방형 경기장 지붕에 대한 순압력의 비정규 특성	천동진 · 김용철 · 윤성원	339~346
추가공사비 분쟁 시 시공사/발주자의 효과적 갈등관리를 위한 게임이론 기반 전략 수립 개념 모델 제안	정성식 · 차희성	347~354
사정변경에 의한 계약 해지 시 손해배상제도에 대한 개선안 제안	이경태 · 김주형	355~363

Contents

Journal of the Architectural Institute of Korea
Vol.41 No.3 (Serial No.437) March 2025

A Study on the Spaces of Under Overpasses from the Perspective of Urban Sustainability	Kim, Soomi	3~14
Developing an Operational Model for Local Construction Safety Centers Based on Status Analysis and Work Monitoring	Kim, Minji · Ryu, Jeyeon · Lee Yeokyung	15~26
Analyzing the Relationship Between Emergency Exit Choice and User Awareness of Evacuation Routes in Mixed-Use Buildings	Kong, Eun-Mi · Kim, Chan-Ju	27~35
A Study on Housing Satisfaction Among Public Silver Housing Residents	Kim, Do-Yeon · Choi, Byungsook · Son, Neung-su	37~48
A Study on Improving Legislation for the Planning of Post-Disaster Temporary Housing	Park, Yeon-Ju · Seo, Hyun	49~60
A Study on Lower-floor Characteristics and Use changes in Adaptive Reuse Buildings in the Seongsu-dong's Semi-industrial Area	Ko, Eun-Kyeong · Kang, Yerin	61~72
Distribution and Characteristics of Musical Instrument Stores in Seoripul Instrument Street	Kwon, Encho · Seo, Hyun	73~83
A Study on the Planning Characteristics of School Complex Facilities in China	Yoo, Hae-Yeon · Kim, Seon-A	85~92
Evaluating the Application of Universal Design in Senior Centers within Permanent Rental Housing Complexes	Park, Kyung-Min · Lee, Tae-Kyung · Kim, Won-Ji	93~101
A Modular Construction Approach to Standardizing Smart Senior Community Centers	Yoo, Sung-Eun · Oh, Myoung-Won	103~112
Developing Location Assessment Criteria for Medical Facility	Lee, Jae Hong · Lee, Jaewook	113~124
Required Modules and volumes for Manned Space Base Construction	Yang, Hyeon-Jeong · Eom, Ye-Seul · Baek, Jin · Chung, Joon-Soo	125~134
Exploring the Architectural Characteristics of Informal Spaces in Alvaro Siza's Faculty of Architecture at the University of Porto	Kim, Jong-Sung	135~145
The Transformation of the Comprehensive Development Plan for the Jamsil District in the 1970s and its Differentiation in Urban Planning and Architecture	Lee, Bokyoung · Kim, Sung Hong	147~158
Exploring Environment in Korean Architectural Discourse During the Developmental Era	Lee, Geon-Il · Baek, Jin	159~170
Architectural Context and Significance of Swoo-Geun Kim's New Ward at the Former Soo-Do Medical College Hospital, 1963-1965	Kim, Hyon-Sob	171~180
A Study on Parking Standards to Promote Urban Housing Supply	Lim, Jae Heon · Kim, Donyun	181~192
Environmental Planning Measures to Support Aging in Place (AIP) for the Elderly	Shin, Sungeun · Byun, Gidong · Ha, Mikyoung	193~204
Analysis of Cognitive Characteristics of CPTED Facilities and Factors Influencing Crime Scare using Eye Tracking	Oh, Se-Jin · Chae, Han-Hee · Lee, Kyung-Hwan	205~214
Utilization of Leisure Spaces and Environmental Perceptions in Low-rise Neighborhood Communities	Lee, Soo-hyun · Byun, Gi-dong · Ha, Mi-kyoung	215~226
Institutional Strategies for Revitalizing Urban Waterfronts of Seoul	Kim, DaeWoon · Choi, JeongYoon	227~238
The Energy Saving Effect of Green Remodeling in Detached Houses	Seo, Hyo-Jeong · Byun, Na-Hyang	239~248
Spatial Strategy Approaches facing Population Decline and Local Extinction	Pak, Sung sine	249~260
Evaluating Energy Consumption Factors Through Panel Data on Building Occupant Requirements	Kim, Hyun-Chang	261~268
Moisture Stability of Lightweight Wood Frame Constructions by Vapor Barrier in Energy Conservation in Buildings	Kim, Minju · Ryu, Hyunjin · Kim, Sughwan	269~280
Comparison of Insulation Performance between Single Panel and Sandwich Panel Exterior Walls in Precast Concrete Apartment Buildings with Load-bearing Wall Structures and Frame Structures	Joo, Na-Young · Song, Seung-Yeong	281~289
Optimizing Lighting Performance by a Microalgae Façade in a Test-bed Culturing Environment	Choe, Seung-Ju · Han, Seung-Hoon	291~300
Evaluation of Effect on Cooling Energy Consumption and Indoor Thermal Environment Caused by Outdoor air Enthalpy Sensor Offset Faults for Economizer during Interseason	Kim, Minho · Jang, Ahmin · Do, Sung Lok	301~308
Evaluation on In-Plane Seismic Response of Masonry Walls Strengthened using Steel-Bar Truss System Incorporating Spring Dampers	Lee, Hye-Ji · Yang, Keun-Hyeok	309~316
Analysis of Nonlinear Seismic Performance in Steel-PC Composite Modular Buildings	Park, Keum-Sung · Oh, Keunyeong · Lee, Sang-Sup	317~325
Impact of V-ties and Bolting Techniques on the Seismic Behavior of Precast Lightweight Aggregate Concrete Special Shear Walls	Kim, Yun-Jeong · Im, Chae-Rim · Mun, Ju-Hyun · Yang, Keun-Hyeok	327~338
Non-Gaussian Characteristics of Net Wind Pressure on Open Stadium Roofs	Cheon, Dong-Jin · Kim, Yong-Chul · Yoon, Sung-Won	339~346
A conceptual proposal of game theory-based strategy for contractor/owner conflict management in additional cost disputes	Jung, Sung-Sik · Cha, Hee-Sung	347~354
Proposals for Improving the Compensation System for Contract Termination Due to Changed Circumstances	Lee, Kyung-Tae · Kim, Ju-Hyung	355~363

Architectural Institute of Korea

President ; Park, Jin Chul Editor-in-Chief ; Kim, Sumin

Office Address ; 87 Hyoryeong-ro, Seocho-gu, Seoul, Korea 06687

Tel ; 82-2-525-1841 Fax ; 82-505-300-1845 E-mail ; journal@aik.or.kr Homepage ; <http://journal.auric.kr/jaik>

프리캐스트 경량골재 콘크리트 특수전단벽의 내진성능에 대한 V-타이와 강판 볼팅 공법의 영향평가

Impact of V-ties and Bolting Techniques on the Seismic Behavior of Precast Lightweight Aggregate Concrete Special Shear Walls

김 윤 정* 임 채 림** 문 주 현*** 양 근 혁****
Kim, Yun-Jeong Im, Chae-Rim Mun, Ju-Hyun Yang, Keun-Hyeok

* 경기대 일반대학원 건축공학과 석사과정, Master's Course Student, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Korea

** 경기대 일반대학원 건축공학과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Korea

*** 경기대 스마트시티공학부 건축공학전공 부교수, Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Korea
(Corresponding author : mjh@kgu.ac.kr)

**** 경기대 스마트시티공학부 건축공학전공 교수, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Korea

Abstract

This study evaluated the seismic performance of precast lightweight aggregate concrete special shear walls (PLCSWs) based on the equivalency concept specified in ACI ITG-5.1. The investigation considered variations in transverse reinforcement, supplementary ties in boundary elements, and wall-to-base connection techniques. All specimens were subjected to cyclic lateral loading and constant axial loads. The results indicated that using V-ties as supplementary ties, applying the steel plate bolting technique for wall-to-base connections, and reinforcement ratio of $1.0A_{sh(KDS)}$ increased the displacement ductility ratio and cumulative work index of PLCSWs by 1.21 and 1.15 times, respectively, compared to specimens using inner crossties, spliced sleeve connection and reinforcement ratio of $2.0A_{sh(KDS)}$. For equivalent structural performance as outlined in ACI ITG-5.1, a reinforcement ratio of $2.0A_{sh(KDS)}$ and the steel plate bolting technique are essential for PLCSWs.

키워드 : 특수전단벽, 경량골재 콘크리트, 변위연성비, 동등성 내진성능

Keywords : Special Shear Wall, Lightweight Aggregate Concrete, Displacement Ductility Ratio, Equivalent Seismic Performance

1. 서 론

프리캐스트 콘크리트(precast concrete, PC) 전단벽은 기초 접합부에서 일체성이 충분히 확보되지 않으면 상부의 횡력이 기초로 원활하게 전달되지 않을 뿐만 아니라 연성 또한 급격히 저하된다(Nam, 2016; Song et al., 2018). 특히 PC 전단벽에서 일반적으로 사용하는 스플라이스 슬리브 공법은 수직철근 또는 경계요소내 주철근의 불연속으로 인한 기초 접합부의 과도한 슬립으로 최대내력 이후의 취성적인 거동이 문제점으로 지적되고 있다(Seo et al., 2020; Zhi et al., 2024). 이러한 취성적 거동은 보통중량 콘크리트(normal-weight aggregate concrete,

NWC) 보다 균열 및 인장저항성이 낮은 경량골재 콘크리트(lightweight aggregate concrete, LWAC)에서 더 심화될 수 있다(Kim et al., 2010). 특히, 구축된 콘크리트 영역에서 그 경향이 더욱 심화되기 때문에 LWAC로 제조된 특수전단벽은 경계요소내에서 더 많은 양의 횡보강근이 요구된다(Yang et al., 2021).

최근에는 스플라이스 슬리브 공법의 낮은 연성의 문제점을 보완할 수 있는 기초 접합에 대한 다양한 공법이 개발되고 있다(Pan et al., 2021; Seo et al., 2020; Yang et al., 2023b). Seo et al.(2020)은 박스형 철물 및 주름관을 이용한 수직철근의 기초 접합방법을 제안하였다. Seo et al.(2020)는 반복횡하중 실험으로부터 접합부의 강도를 강화시킨 주름관이 스플라이스 슬리브 공법에 비해 에너지 소산 능력을 1.22 ~ 1.74배 증가시킬 수 있음을 보였다. 또한, Pan et al.(2021)은 PC 전단벽에서 고연성을 확보하기 위해서 볼트-플레이트 연결 공법을 개발하였다.

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022R1A2B5B03002476 및 No. RS-2024-00405537)임.

Pan et al.(2021)은 반복횡하중 실험으로부터 개발된 공법으로 접합된 PC 전단벽은 일체형 전단벽과 유사한 수준의 변위각비 및 누적 에너지 소산능력을 보유하고 있음을 검증하였다. 또한, Yang et al.(2023b)는 LWAC로 제조된 PC 전단벽에서 최대내력 이후의 연성을 충분히 확보할 수 있는 강판 볼팅 공법을 개발하였다. Yang et al.(2023b)의 연구에 따르면, 강판 볼팅 공법은 기초 접합부에서 일체성을 충분히 확보하여 스플라이스 슬리브 공법 이상의 변위연성비 및 일손상지수를 확보할 수 있다. 그러나 Seo et al.(2020)의 연구는 NWC로 제조된 전단벽에서 개발된 기초 접합부의 휨 내력(접합강도)에 대한 ACI 318-19(2019)와 같은 설계기준의 안전성을 검증하는 데에만 중점을 두고 있으며, 특히 PC 전단벽에서 중요한 동등성 개념의 내진성능의 검증이 이루어지지 않아 실질적인 내진성능의 확보여부를 평가할 수 없다. Pan et al.(2021)과 Yang et al.(2023b)의 연구는 극히 제한된 횡보 강근 배근량(A_{sh})의 범위에서 수행되었으며, 동등성 개념의 내진성능 평가도 이루어지지 않았다. 게다가 경계요소 내의 보조 띠철근으로서 크로스타이의 배근은 90° 후크의 벌어짐이 여전히 발생하였다. 따라서 강판 볼팅 공법에 대한 안전성 검증은 LWAC로 제조된 PC 전단벽에서 동등성 개념의 내진성능 평가에 기반하여야 하며, 연성확보 측면에서 A_{sh} 와 보조 띠철근 종류의 변화를 포함하는 포괄적인 변수를 고려한 구조적 안전성의 평가가 필요하다.

이 연구의 목적은 프리캐스트 경량골재 콘크리트 특수 전단벽(precast lightweight aggregate concrete special shear wall, PLCSW)에서 기초 접합방법으로서 강판 볼팅 공법(Yang et al., 2023b)에 대한 내진성능을 평가하는데 있다. 주요변수는 A_{sh} 와 보조 띠철근의 종류 그리고 벽체와 기초부의 접합방법이며, 총 4개의 PLCSW 실험체를 제작하였다. PLCSW 실험체의 휨 연성은 균열진전 및 파괴모드, 횡하중-횡변위관계, 최대 휨 내력, 변위연성비 및 누적 일손상지수로부터 평가하였다. PLCSW 실험체의 휨 내력의 안전성은 KDS 14 20 00(2021) 설계기준의 예측값과 비교하여 검증하였다. 또한, PLCSW 실험체의 구조적 안전성은 ACI ITG-5.1(2007)에서 제시하는 동등성 개념의 내진성능 평가를 통해 검증하였다.

2. 실험

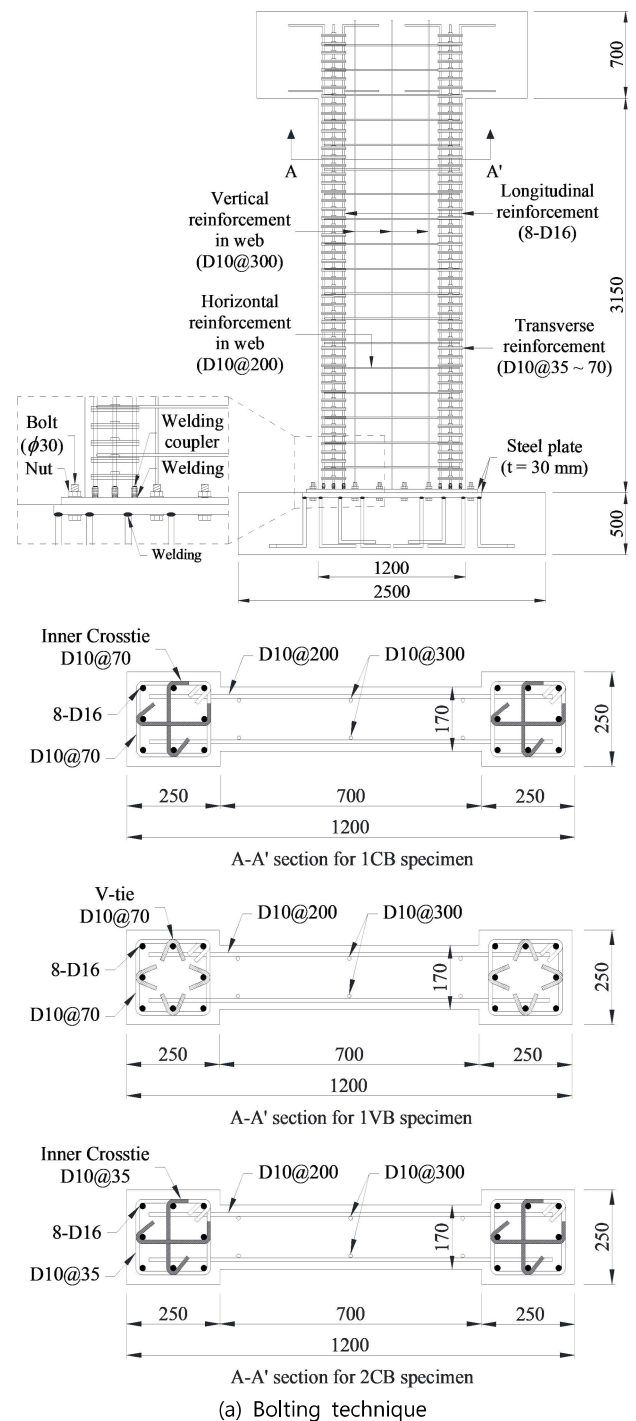
2.1 실험체 상세

Table 1과 Figure 1에는 실험체 상세를 나타내었다. 주요변수는 A_{sh} 와 보조 띠철근의 종류 그리고 벽체와 기초부의 접합방법이다. 전단벽의 연성에 가장 크게 영향을 미치는 변수인 A_{sh} 은 KDS 14 20 00(2021)에서 제시하고 있는 최소 횡보강근 배근량($A_{sh(KDS)}$)의 1.0배(횡보강근 간격(s_{tr}) = 70 mm) 및 2.0배(s_{tr} = 35 mm)로 설정하였다. 보조 띠철근의 종류는 일반적으로 사용하는 보조 띠철근인 크로스타이와 기둥의 연성 향상을 위해 Yang(2015)에

Table 1. Details of special shear wall specimens

Specimens	Transverse reinforcement			Type of inner-tie	Connection method
	$\frac{A_{sh}}{A_{sh(KDS)}}$	s_{tr} (mm)	ω_{nh}		
1CB	1.0	70	0.211	Inner crosstie	Bolting
1VB				V-tie	
2CS	2.0	35	0.411	Inner crosstie	Spliced sleeve
2CB					Bolting

Note. s_{tr} = vertical intervals of transverse reinforcement, and ω_{nh} = volumetric index of transverse reinforcement at boundary element.



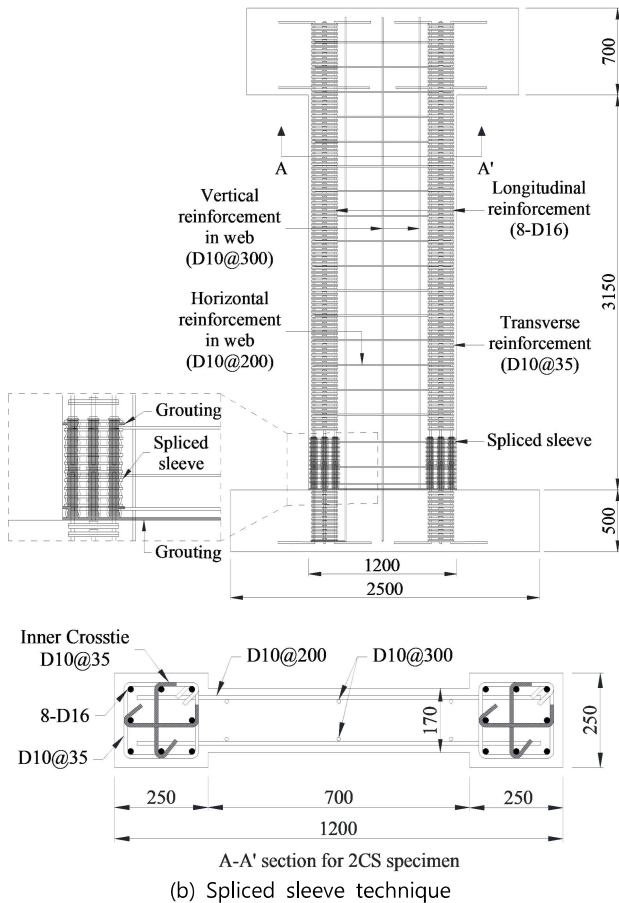


Figure 1. Details of the PLCSW specimens

의해 개발된 V-타이로 설정하였다. 기존 연구(Yang, 2016; Lee, Yang, & Kwak, 2017)에 따르면, V-타이를 배근한 기둥의 압축연성비는 크로스타이를 배근한 기둥보다 약 1.2배 이상 높았으며, 최대내력(P_n) 이후 P_n 의 80%로 저하되는 시점에서의 누적 일손상지수는 크로스타이를 배근한 기둥보다 약 2.2배 높았다. 이와 같은 연구 결과로부터 V-타이는 크로스타이보다 코어 콘크리트를 구속하는 효과가 높음을 알 수 있다(Yang & Kim, 2016). 사용된 V-타이의 상세는 Figure 2에 나타내었다. V-타이의 절곡각도는 주철근과의 부착 및 시공 시의 간섭을 고려하여 45° 로 설계하였으며, 문힘길이는 띠철근 같고리의 여장길이에 대한 설계기준(KDS 14 20 00(2021))을 고려하여 60 mm로 설정하였다(Kim & Yang, 2015). V-타이

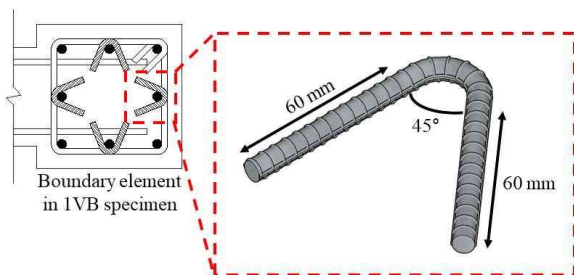


Figure 2. Detail of V-tie bar

와 주철근의 고정에는 윈터치 클립을 이용하였다.

벽체와 기초부의 접합방법은 Yang et al.(2023b)에 의해 개발된 강판 볼팅 공법과 PC 구조부재에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 스플라이스 슬리브 공법으로 선정하였다(Figure 3). 강판 볼팅 공법은 전단벽에 설치되는 강판과 기초에 설치되는 강판 사이를 접합하는 고장력 볼트 및 너트에 의해 극대화된 마찰력으로 외부에서 도입되는 횡력을 저항한다. 특히, 고장력 볼트의 인장력은 전단벽의 인장철근에 의해 발생하는 인장력보다 크게 설계하였으며, 강판은 고장력 볼트 및 너트에 의한 지압력에 충분한 저항이 가능한 두께로 결정하였다. 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW의 제작방법은 다음과 같다: 1) PLCSW 벽체의 바닥면과 기초의 상부에 각각 강판을 설치한다; 2) 벽체의 바닥면에 설치한 강판은 용접 커플러를 이용하여 경계요소에 배근된 수직철근과 용접하며, 기초 상부에 설치한 강판은 기초에 매립된 수직철근과 용접한다; 3) 벽체와 기초는 각각 타설하여 별도로 제작한다; 4) 별도로 제작된 벽체와 기초는 설치된 강판의 홀과 볼트 및 너트를 이용하여 고정한다. 또한, 강판 볼팅 공법은 기초와의 접합뿐만 아니라 각 층에서의 수평접합에서도 동일하게 적용할 수 있다. 각 층에서의 수평접합 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다: 1) 공장에서 제작되는 PC 전단벽은 하부뿐만 아니라 상부에도 강판을 설치한다; 2) 경계요소내의 주철근은 상부 및 하부에 설치된 강판에 용접커플러를 이용하여 용접한다; 3) 콘크리트 타설 이후 양생된 PC 전단벽은 각 층에서의 강판과 볼트 및 너트를 이용하여 수평접합한다. 다만, 이 연구에서는 모멘트가 최대가 되는 기초접합의 안전성을 평가하는 것이 주요 목적이므로 실험체에서 여러 층을 구현하지 않았다.

한편, 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 PLCSW의 제작방법은 다음과 같다: 1) 벽체에는 스플라이스 슬리브를 기초와 결합되는 위치에서 경계요소내 주철근 위치에 미리 매립한다; 2) 기초에는 스플라이스 슬리브와의 결합을 위한 돌출철근을 미리 매립한다; 3) 벽체와 기초는 각각 타설하여 별도로 제작한다; 4) 기초의 돌출철근은 벽체 내에 미리 설치된 스플라이스 슬리브에 삽입한다; 5) 스플라이스 슬리브는 60 MPa의 고유동 모르타르를 그라우팅하여 벽체와 기초가 접합되도록 한다.

실험체명에서 첫 번째 숫자는 A_{sh} ($1 = 1.0A_{sh(KDS)}$, $2 = 2.0A_{sh(KDS)}$)을, 두 번째 알파벳은 보조 띠철근의 종류($C =$ 크로스타이, $V =$ V-타이)를, 그리고 세 번째 알파벳은 벽체와 기초부의 접합방법($S =$ 스플라이스 슬리브 공법, $B =$ 강판 볼팅 공법)을 의미한다. 예를 들어 실험체 1VB는 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 이며, 보조 띠철근으로서 V-타이가 배근되고, 벽체와 기초부가 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW이다.

PLCSW 실험체는 벽체의 양단에 단면 크기가 250 mm × 250 mm의 경계요소를 갖는 바벨형으로 설계하였다. 이와 같이 경계요소를 바벨형으로 설정한 이유는 설계기준(ACI 318-19, 2019; KDS 14 20 00, 2021)에서 요구되는 띠철근량을 만족시키면서 최대한도로 띠철근 배근의 간

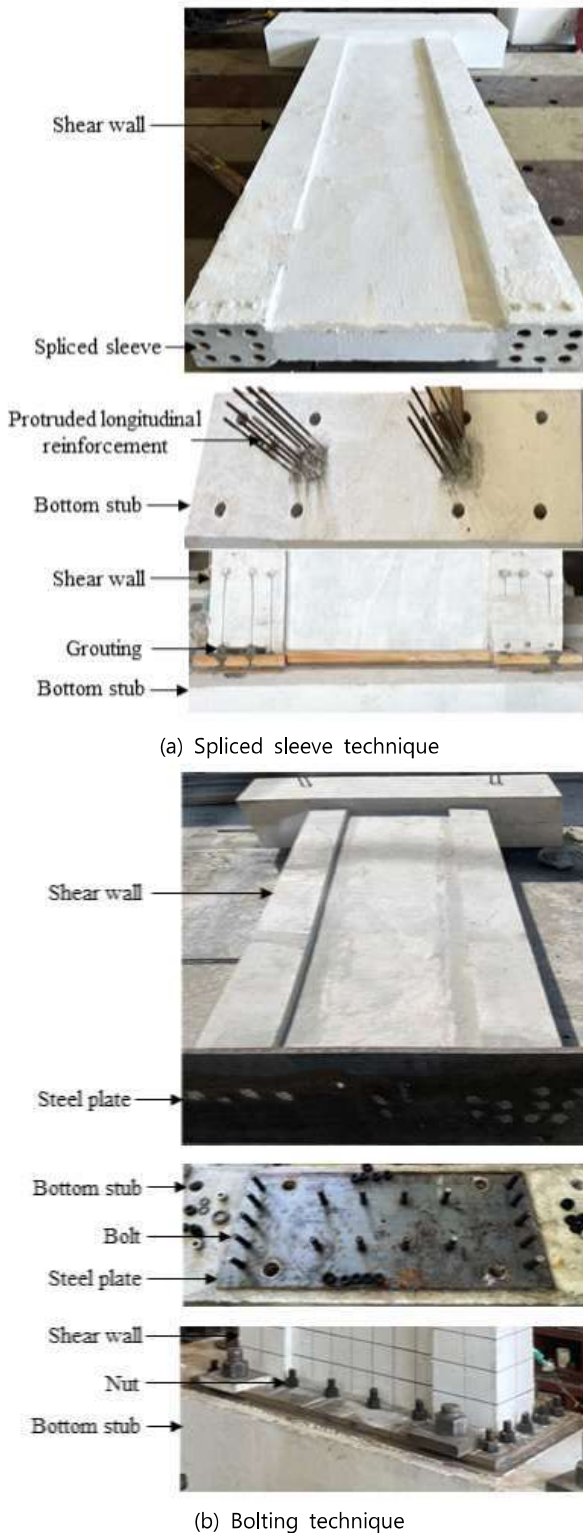


Figure 3. Connection method between the wall and base

격을 완화시키기 위함이다. 특히, Yang et al.(2023c)의 연구에 따르면, 직사각형인 전단벽은 설계기준에서 요구하는 띠철근량에 의해 경계요소에서 띠철근의 간격이 매우 좁고 과밀화되는 문제점이 발생할 수 있다고 지적하였다. 또한, 실험체의 길이(l_w), 웨브의 두께(b_w) 및 높이(h_w)는 각각 1,200 mm, 170 mm 및 3,150 mm이다. 실험체의 상

부 및 하부 스토퍼의 크기는 각각 2,200 mm × 700 mm × 400 mm 및 2,500 mm × 500 mm × 800 mm이다. 경계요소내 주철근은 직경이 16 mm인 이형철근 8개를 배근하였는데, 이때의 주철근비(ρ_s)는 0.025이다. 경계요소의 횡보강근은 직경이 10 mm인 이형철근을 주요변수인 A_{sh} 에 따라 달리 배근하였는데, 이때의 횡보강근 체적비(ω_{vh})는 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 및 $2.0A_{sh(KDS)}$ 에서 각각 0.211 및 0.411이다. 웨브의 수평 및 수직 전단철근은 직경이 10 mm인 이형철근을 각각 200 mm 및 300 mm 간격으로 배근하였는데, 이때의 수평(ρ_h) 및 수직(ρ_v) 전단철근비는 각각 0.004 및 0.003이다.

2.2 사용재료

Table 2에는 사용한 인공 경량골재의 물리적 특성을 나타내었다. 사용된 인공 경량골재는 바텀애시와 준설토를 주재료로 사용하여 성형 및 소성한 것을 사용하였다(Lee, 2018). 이러한 인공 경량골재는 점토기반의 팽창 경량골재와 유사하게 외부표면의 피막구조와 내부의 다공성 구조를 가져 천연골재보다 밀도가 낮고 흡수율이 높은 것이 특징이다(Lee & Yang, 2018). 사용된 인공 경량골재의 기건밀도는 1,450 kg/m³이고 조립률은 5.57이다. 특히 흡수율은 평균 12.9%로 높아, 배합 시 슬럼프 저하의 원인을 방지하고자 배합 전 24시간 프리웨팅을 진행하였다. 인공 경량골재 콘크리트의 목표 압축강도(f_{cd})와 단위용적중량(ρ_{cd})은 각각 35 MPa 및 1,600 kg/m³으로 설정하였다. f_{cd} 와 ρ_{cd} 을 고려하여 PLCSW 실험체 제작을 위해 적용된 콘크리트의 배합표는 Table 3에 나타내었다. 특히, 경량골재 콘크리트 배합은 Lee et al.(2022)의 실험 결과에 기반하여 결정하였다. 구조실험 직전 측정된 콘크리트의 압축강도(f_{ck}) 및 단위용적중량(ρ_c)은 각각 39.6 MPa 및 1,755 kg/m³으로 f_{cd} 와 ρ_{cd} 의 값과 비슷한 수준이었다. 전경량골재 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Figure 4에 나타내었다. 전경량골재 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 ASTM C 496(2014)의 기준에 준하여 측정하였는데, 측정된 결과 20,812 MPa로서 KDS 14 20 00(2021)의 기준으로 산정한 값(=19,198 MPa)과 비슷하였다. Table 4에는 사용된 강재의 역학적 특성을 나타내었다. 사용된 철근들의 항복강도와 인장강도는 직경 16 mm에서 각각 431 MPa와 577 MPa이었으며, 직경 10 mm에서 각각 477 MPa 및

Table 2. Physical properties of artificial lightweight aggregates




Type	Range of aggregate size (mm)	Water absorption (%)	Fineness modulus	Oven-dried density (kg/m ³)	Appearances
Lightweight aggregate	Below 5	10.3	2.90	1,500	
	5 ~ 13	12.2	7.40	1,400	
	13 ~ 20	14.1	6.41	1,400	

Table 3. Mixture proportion of concrete

Concrete type	f_{cd} (MPa)	ρ_{cd} (kg/m ³)	W/C	S/a	Unit weight (kg/m ³)				f_{ck} (MPa)	ρ_c (kg/m ³)
					W	C	C_L	F_L		

Note. f_{cd} and ρ_{cd} = targeted compressive strength and unit weight of concrete, respectively, W/C = water-to-binder ratio by weight, S/a = fine aggregate-to-total aggregate ratio by volume, W = water, C = ordinary portland cement, C_L and F_L = coarse and fine lightweight aggregates, respectively, f_{ck} and ρ_c = measured compressive strength and unit weight of concrete, respectively.

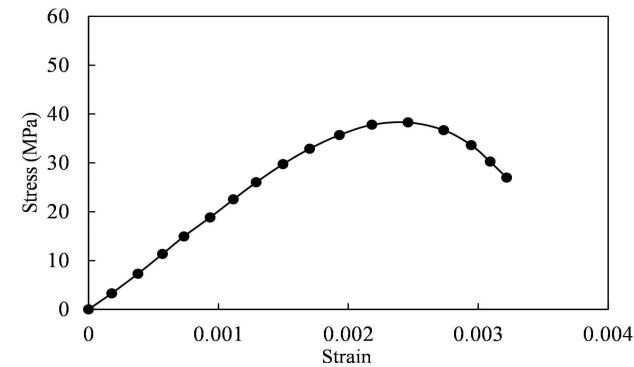


Figure 4. Stress-strain curve of all-lightweight aggregate concrete

Table 4. Mechanical properties of reinforcements

Steel type	Diameter (mm)	Yield strength (MPa)	Yield strain	Tensile strength (MPa)	Tensile strain	Modulus of elasticity (MPa)
Deformed bars	10	440	0.0023	572	0.167	194,115
	16	431	0.0022	577	0.129	203,561
Bolt	30	1,010	0.0048	1,153	0.146	210,416
Plate	30*	240	0.0012	431	0.267	205,000
Spliced sleeve	60	564	0.0034	706	0.109	165,882

*"30 mm" indicates plate thickness.

572 MPa이었다. 볼트의 항복강도 및 탄성계수는 각각 1,010 MPa 및 210,416 MPa이었다. 두께 30 mm인 강판의 항복강도 및 탄성계수는 각각 240 MPa 및 205,000 MPa이었다. 직경 60 mm인 스플라이스 슬리브의 항복강도 및 탄성계수는 각각 564 MPa 및 165,882 MPa이었다.

2.3 실험체 가력 및 측정방법

Figure 5에는 PLCSW 실험체의 가력상세를 나타내었다. 축하중은 1,000 kN 용량의 오일잭 2개를 사용하여 작용 축하중비($N_u/f_{ck}A_g$)를 일정하게 도입하였는데, 여기서 N_u 및 A_g 는 각각 작용 축하중 및 실험구간의 전체 단면적을 의미한다. 특히, $N_u/f_{ck}A_g$ 는 0.1로 설정하였는데, 이는 전 단벽 시스템을 갖는 구조물의 구조설계에서 일반적으로 적용되는 축하중과 기존 연구결과(Chun, 2015; Mun, Oh et al., 2022)에서 적용된 범위를 고려한 값이다. 실험 도중 축하중의 변화는 오일잭 하부에 부착된 1,000 kN 용량의 로드셀로부터 확인하였다. PLCSW 실험체는 하부 스티브에 관통된 4개의 구멍과 직경 70 mm의 강제 볼트를 이용하여 반력판에 완전히 고정하였다. 상부 스티브의 양 측면에는 횡가력에 의한 지압파괴를 방지하기 위해

강제 블록을 설치하였다. 횡하중은 2,000 kN 용량의 액츄에이터를 사용하여 도입하였다. 모든 PLCSW 실험체는 FEMA 356(2000) 기준에 따라 제시된 변위이력으로 횡하중을 도입하였다(Figure 6). 횡변위는 용량이 300 mm인 변위계(linear variable differential transducers, LVDT)를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열 진전 및 파괴모드

Figure 7에는 PLCSW 실험체의 균열 진전 및 최종 파괴모드를 나타내었다. 모든 PLCSW 실험체는 변위각비(δ_R)가 0.44%(1 사이클)에서 초기 수평 휨 균열이 발생하였다. δ_R 가 1.47%(13 사이클)에서는 P_n 에 도달함과 동시에 콘크리트의 파괴가 박리되었다. 이후, 상부로 진전된 휨 균열은 웨브에서 사인장 균열로 확장되었다. 주철근의 좌굴은 δ_R 가 1.77%(16 사이클)일 때 발생하였는데, 그 발생시점은 벽체와 기초부의 접합방법 및 A_{sh} 에 의해 현저한 영향을 받았다. $1.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 1CB 및 1VB는 δ_R 가 1.77%(16 사이클)일 때 주철근의 좌굴이 발생하였다. A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB의 주철근 좌굴시점은 δ_R 가 2.32%(19 사이클)일때로 가장 늦게 발생하였는데, 이

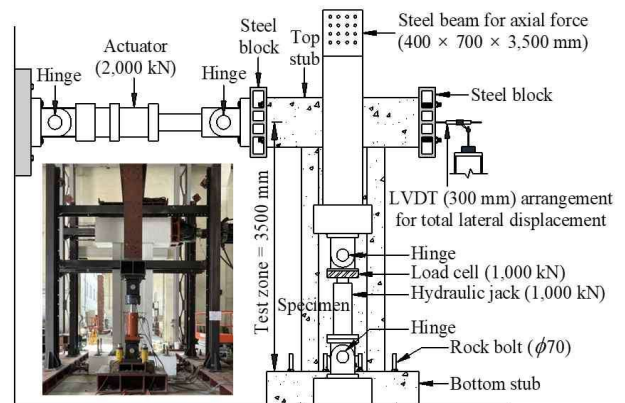


Figure 5. Test set-up

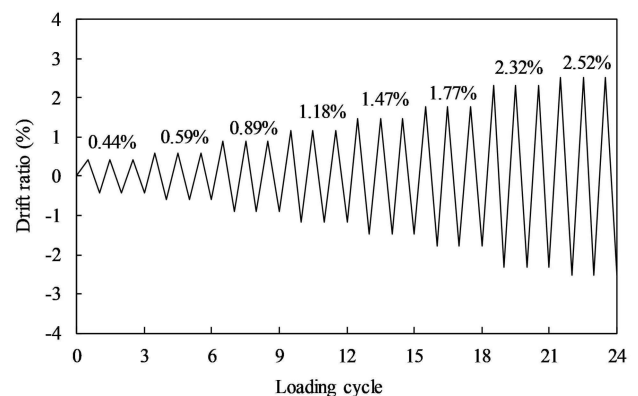


Figure 6. Lateral loading history

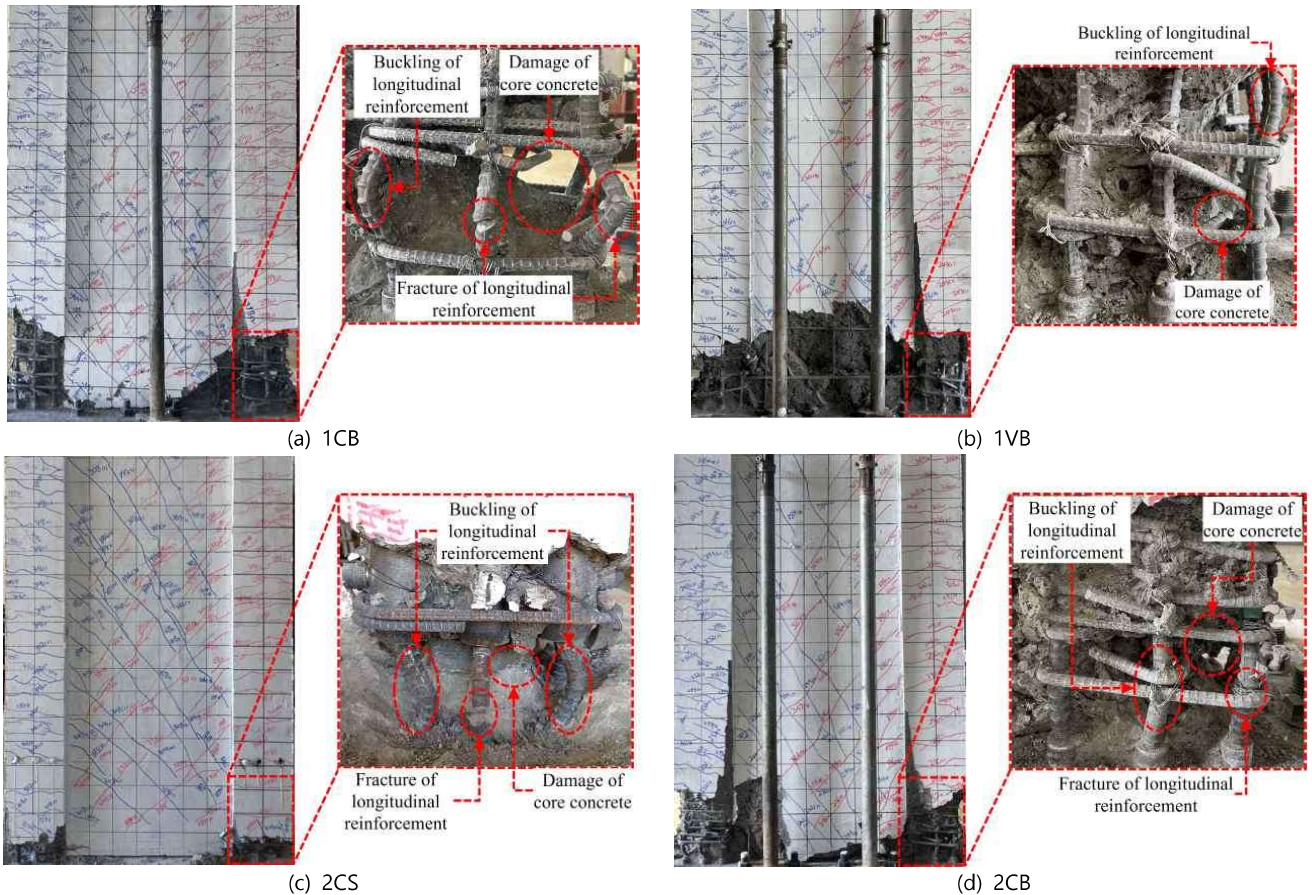


Figure 7. Crack propagations and failure mode of PLCSW specimens

시점은 동일한 A_{sh} 로 설계되고 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체 2CB보다 3 사이클 더 늦었다. 또한, 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체의 소성힌지영역은 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체보다 약 2.6배 이상 넓었다. 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체에서 관찰된 좁은 소성힌지 영역의 원인은 벽체와 기초의 접합부에서 발생하는 슬립 변위에 의한 것으로 판단된다(Yang et al., 2023a). 특히, 실험종료 시점에서의 파괴양상은 보조 띠철근의 종류에 의해 현저한 영향을 받았다. 실험종료 시점에서 보조 띠철근으로서 V-타이를 배근한 실험체 1VB는 V-타이의 벌어짐이 나타나지 않았다. 결과적으로 실험체 1VB는 보조 띠철근으로서 크로스타이를 배근한 실험체 1CB보다 코어 콘크리트 영역의 손상이 적었다. 이는 보조 띠철근으로서 V-타이와 강판 볼팅 공법의 사용이 PLCSW 실험체에서 발생하는 주철근의 좌굴시점을 지연시키고 보조 띠철근에서 발생하는 90도 후크 부분의 벌어짐을 방지하는데 효과적임을 의미한다.

3.2 횡하중-횡변위 관계

Figure 8에는 PLCSW 실험체의 횡하중-횡변위 관계를 나타내었다. PLCSW 실험체의 초기강성은 보조 띠철근으로 V-타이가 배근되고 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 1VB에서 가장 높았다. 초기 휨 균열의 발생 이후 모든 PLCSW 실험체의 강성은 저하되기 시작하였으며, 그

강성 저하는 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체 2CS에서 가장 현저하였다. 실험체 2CS는 P_n 에 가장 빠르게 도달하였으며, P_n 이후의 하중 저하가 가장 급격하게 발생하였다. $1.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 1CB 및 1VB는 유사한 거동을 보였지만, 주철근의 좌굴 이후 거동은 보조 띠철근으로 V-타이가 배근된 실험체에서 더 연성적인 경향을 보였다. 따라서 강판 볼팅 공법으로 접합되고 보조 띠철근으로 V-타이가 배근된 PLCSW 실험체는 P_n 이후의 거동이 연성적으로 유도될 수 있음을 확인하였다. 특히 A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB는 P_n 이후의 거동이 가장 연성적인 경향을 보였다. 이로부터 A_{sh} 의 증가가 PLCSW 실험체의 연성 확보에 효과적이며, 그 효과가 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW 실험체에서 가장 현저하였음을 확인하였다.

3.3 최대 휨 내력(M_n)

Table 5에는 PLCSW 실험체의 최대 휨 내력(M_n)과 KDS 14 20 00(2021)에서 제시하고 있는 콘크리트 등가응력블록에 의해 산정된 휨 모멘트($M_{n(KDS)}$)를 비교하여 나타내었다. A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB의 M_n 은 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 인 실험체 1CB보다 약 1.1배 높았으며, 모든 PLCSW 실험체 중에서 가장 높은 M_n 을 보였다. 한편, A_{sh} 가 동일한 PLCSW 실험체

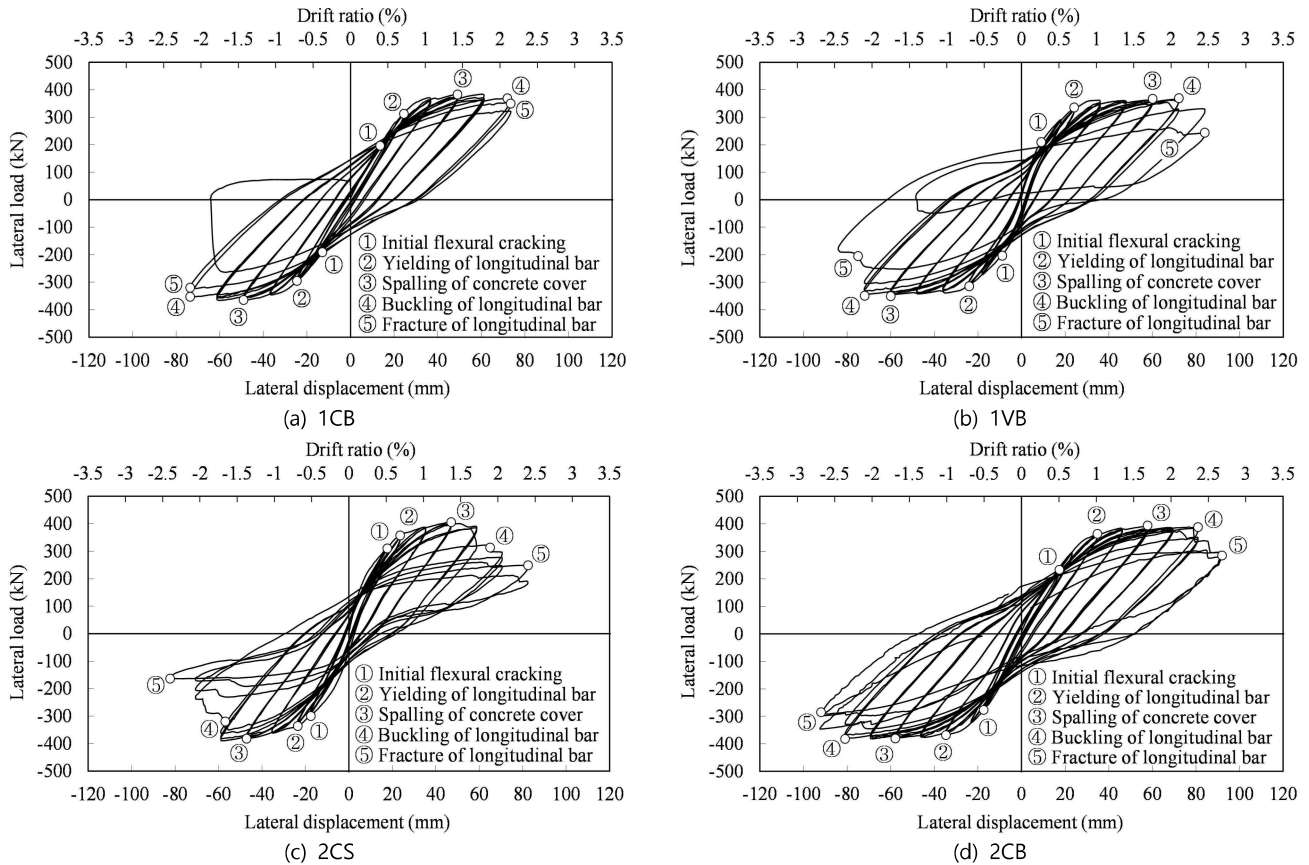


Figure 8. Lateral load-displacement relationships of PLCSW specimens

험체들 간의 M_n 은 상호 유사한 수준이었으나, 보조 띠철근으로 V-타이가 배근된 실험체 1VB와 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB의 M_n 은 각각 크로스 타이로 배근된 실험체 1CB와 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체 2CS보다 높았다. 이로부터 동일한 A_{sh} 를 가진 PLCSW 실험체에서 보조 띠철근으로 V-타이를 배근하고, 강판 볼팅 공법으로 벽체와 기초부를 접합하는 것이 M_n 을 향상시키는데 유리하다고 판단된다.

PLCSW 실험체의 M_n 에 대한 안전성은 KDS 14 20 00(2021) 기준에서 예측된 값과의 비교로부터 평가하였다. 실험결과 대비 예측값의 비($M_n/M_{n(KDS)}$)가 1.0 이상이면 KDS 14 20 00(2021)의 설계기준이 실험결과를 안전측으로 예측함을 의미한다. $M_n/M_{n(KDS)}$ 는 1.08 ~ 1.18로 모든 PLCSW 실험체가 KDS 14 20 00(2021)에 의해 안전측으로

평가되었다. 특히 $M_n/M_{n(KDS)}$ 는 A_{sh} 가 높거나, 보조 띠철근으로 V-타이가 배근되거나, 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW 실험체에서 높았다.

3.4 변위연성비(μ_Δ)

PLCSW 실험체의 변위연성비(μ_Δ)는 다음의 식을 이용하여 계산하였다(Watson and Park, 1994).

$$\mu_\Delta = \Delta_{80}/\Delta_y \quad (1)$$

여기서, Δ_y 와 Δ_{80} 는 경계요소 내 주철근 항복 시점에서의 횡변위와 P_n 이후 P_n 의 80%로 저하되는 시점에서의 횡변위를 의미한다. Table 5에 나타난 바와 같이 PLCSW 실험체의 μ_Δ 는 A_{sh} , 보조 띠철근의 종류, 그리고 벽체와

Table 5. Summary of test results

Specimens	P_y (kN)		P_n (kN)		M_n (kN·m)	Δ_y (mm)	Δ_{80} (mm)	μ_Δ	W_{80}	$M_{n(KDS)}$ (kN·m)	$\frac{M_n}{M_{n(KDS)}}$
	+	-	+	-							
1CB	332	330	361	347	1,239.0	20.4	78.5	3.85	81.5	1,147.8	1.08
1VB	312	295	367	351	1,256.5	20.3	81.1	4.00	90.5		1.09
2CS	346	325	393	371	1,337.0	20.9	69.0	3.30	78.7		1.16
2CB	336	327	392	382	1,354.5	19.3	87.4	4.54	140.5		1.18

Note. P_y and P_n = lateral loads at longitudinal reinforcement yielded and the peak load, respectively, M_n and $M_{n(KDS)}$ = measured and predicted flexural moment capacities, Δ_y and Δ_{80} = displacements at yield state and 0.8 P_n after P_n , respectively, μ_Δ = displacement ductility ratio, and W_{80} = cumulative work damage indicator 0.8 P_n after P_n .

기초부의 접합방법에 의해 미치는 영향이 현저하였다. A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB의 μ_{Δ} 는 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 인 실험체 1CB보다 1.18배 높았으며, 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체 2CS보다 1.38배 높았다. 특히 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 이며 보조 띠철근으로 V-타이가 배근되고 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 1VB의 μ_{Δ} 는 A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 보조 띠철근으로 크로스타이가 배근되고 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체 2CS보다 1.21배 높았다. 이로부터 동일한 A_{sh} 를 가진 PLCSW 실험체의 μ_{Δ} 를 향상시키기 위해서는 보조 띠철근으로 V-타이를 배근하고, 강판 볼팅 공법으로 벽체와 기초부를 접합하는 것이 효과적임을 확인하였다.

3.5 누적 일손상지수(W)

PLCSW 실험체의 누적 일손상지수(W)는 다음의 식을 이용하여 계산하였다(Sheik and Khoury, 1997).

$$W = \frac{1}{P_n \Delta_y} \sum_{m=1}^n (E_m) \left(\frac{K_m^+ + K_m^-}{2K_y} \right) \left(\frac{\Delta_m^+ + \Delta_m^-}{2\Delta_y} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, n 은 가력 사이클 수, E_m 은 m 번째 가력 사이클에서 이력루프의 면적, K_m^+ 및 K_m^- 은 각각 m 번째 가력 사이클에서 정 및 부방향의 강성, Δ_m^+ 및 Δ_m^- 은 각각 m 번째 가력 사이클에서의 정 및 부방향의 최대 횡변위를 의미한다. Table 5에는 PLCSW 실험체의 P_n 이후 P_n 의 80%까지 누적하여 산정된 일손상지수(W_{80})를 나타내었다. PLCSW 실험체의 W_{80} 은 A_{sh} , 보조 띠철근의 종류, 그리고 벽체와 기초부의 접합방법에 의해 미치는 영향이 현저하였다. A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB의 W_{80} 은 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 인 실험체 1CB보다 1.72배 높았으며, 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체 2CS보다 1.79배 높았다. 또한, A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 이며 보조 띠철근으로 V-타이가 배근되고 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 1VB의 W_{80} 은 A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 보조 띠철근으로 크로스타이가 배근되고 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체 2CS보다 1.15배 높았다. 이러한 실험결과를 바탕으로 PLCSW 실험체에서 보조 띠철근으로서 V-타이를 배근하고 강판 볼팅 공법으로 접합하면 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 이고 LWAC로 제작되었어도 $2.0A_{sh(KDS)}$ 으로 설계된 실험체와 비슷한 수준의 W_{80} 을 발휘할 수 있다.

4. 절대적 동등성 평가

4.1 한계변형각(δ_L)

PLCSW 실험체의 내진성능은 ACI ITG 5.1-07(2007)에서 제시하고 있는 PC 특수전단벽의 절대적 동등성 규정으로 평가하였다. ACI ITG 5.1-07(2007)은 PC 전단벽에서 저하

되는 내력, 강성 및 연성을 보완하기 위해서 절대적 동등성 관점에서 전단벽의 내진성능을 평가하고 있다. 제시된 내진성능은 최대하중비($P_n/P_{n(ACI)}$), 강도저감비(P_L/P_n), 강성저감비(K_L/K_1) 및 상대적 에너지 소산 면적비(β_L)이다. 여기서, $P_{n(ACI)}$ 및 P_L 은 각각 설계기준에 의해 산정된 최대하중의 예측값과 한계변형각(δ_L)에서 실험체의 횡하중의 실험값을 의미하며, K_1 및 K_L 은 초기변위의 첫 번째 사이클 및 δ_L 에서의 강성을 의미한다. 특히, P_L/P_n , K_L/K_1 및 β_L 는 δ_L 에서의 실험결과값을 기준으로 평가하는데, 이는 PC 전단벽의 연성능력에 밀접한 관련이 있는 평가지표이다. 따라서, PC 전단벽은 충분한 연성을 확보하기 위해서 δ_L 이상의 변형 능력과 그 시점에서의 일점강 이상의 강도, 강성 및 에너지 소산능력이 요구된다. ACI ITG 5.1-07(2007)은 δ_L 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$1.0 \leq \left(\delta_L = 0.67 \frac{h_w}{l_w} + 0.5 \right) \leq 3.0 \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 산정한 PLCSW 실험체의 δ_L 은 2.45%이었다. 이는 기존 연구(Oh, 2021; Oh et al., 2021)의 PC 특수전단벽에서 제시된 δ_L (2.0% ~ 2.3%)과 비슷한 수준이었다. Table 6 및 Figure 9에는 ACI ITG 5.1-07(2007)의 절대적 동등성의 평가결과를 요약하여 나타내었다. A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB의 최종과괴시점의 변형각(δ_F)은 2.64%로서 δ_L 이상이었다. 이에 반해 그 외의 PLCSW 실험체들은 δ_F 가 2.06% ~ 2.40%의 범위로서 δ_L 보다 작았다. 따라서 4.2절 및 4.3절에서는 2CB 실험체만이 ACI ITG 5.1-07(2007)에서 제시된 4가지 지표($P_n/P_{n(ACI)}$, P_L/P_n , K_L/K_1 및 β_L)에 의한 평가가 가능하였다.

4.2 최대하중비($P_n/P_{n(ACI)}$)

$P_n/P_{n(ACI)}$ 는 최대하중의 예측값 대비 실험값의 비로서 PC 전단벽에서 횡하중이 충분히 발휘되었는지를 확인하기 위한 지표이다. ACI ITG 5.1-07(2007)은 $P_n/P_{n(ACI)}$ 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$0.9 \leq P_n/P_{n(ACI)} \leq 1.2 \quad (4)$$

Table 6. Summary of equivalent seismic performance assessment according to ACI ITG 5.1-07

Specimens	δ_F (%)	$P_n/P_{n(ACI)}$	P_L/P_n	K_L/K_1	β_L	Satisfaction
1CB	2.06	1.08	-	-	-	NG
1VB	2.40	1.09	-	-	-	NG
2CS	2.35	1.16	-	-	-	NG
2CB	2.64	1.18	0.896	0.286	0.318	OK

Note. δ_F = drift ratio at test termination, $P_{n(ACI)}$ = predicted peak load transformed from $M_{n(ACI)}$, P_L = lateral load at drift ratio limit(δ_L), K_L = stiffness dissipation ratio at δ_L , K_1 = average stiffness at the first cycle, and β_L = relative energy dissipation ratio.

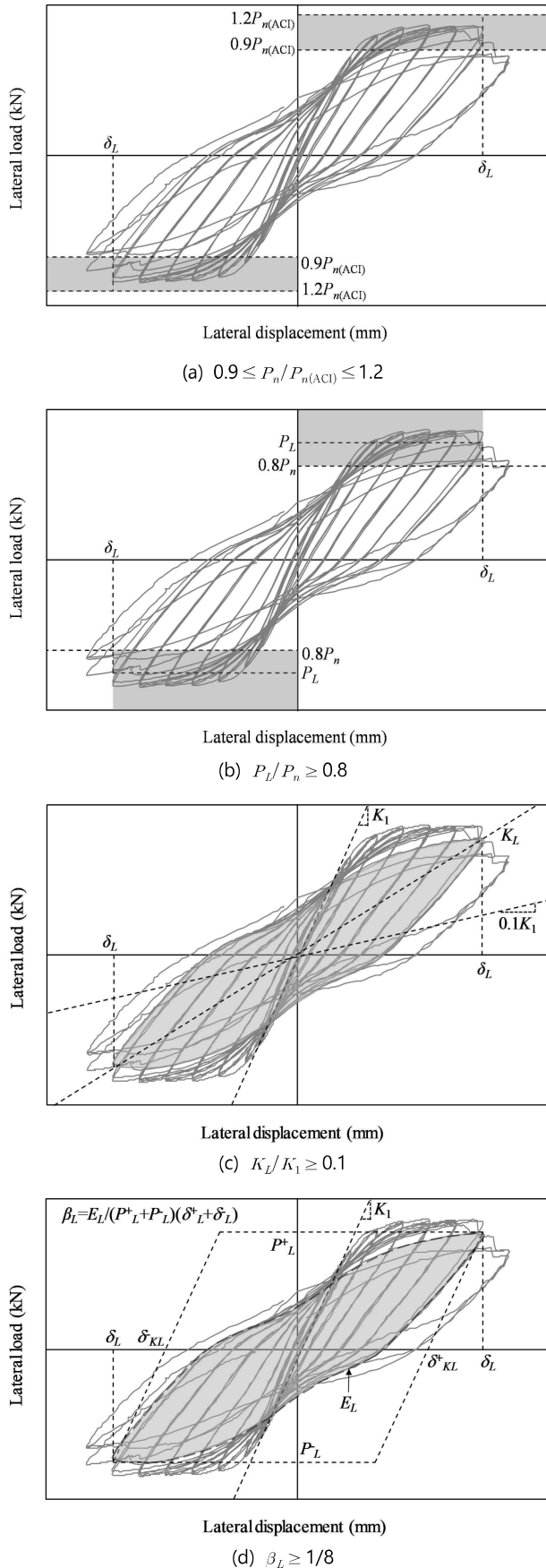


Figure 9. Seismic performance requirements of PC walls specified in ACI ITG 5.1-07(2007)

식 (4)에서 $P_{n(ACI)}$ 는 일체형 특수전단벽에서 ACI 318-19(2019)에 의해 산정된 모멘트($M_{n(ACI)}$)로부터 환산된 횡하중의 값을 의미한다. 식 (4)에서 $P_n/P_{n(ACI)}$ 를 0.9 이상으로 설정한 이유는 PC 전단벽의 접합으로 인해 발생할 수 있는 최대횡하중 저하를 10% 이내로 제한하기 위함이다. 또한, $P_n/P_{n(ACI)}$ 가 0.9 ~ 1.2의 범위 내에 있는 PC 특수전단벽은 일체형 특수전단벽과 동등한 횡하중 성능을 발휘한다고 판단하는 기준이 된다. Table 6 및 Figure 9(a)에 나타난 바와 같이 PLCSW 실험체의 $P_n/P_{n(ACI)}$ 는 1.08 ~ 1.18에 있었다. 즉, 모든 PLCSW 실험체는 A_{sh} 과 보조 띠철근의 종류, 그리고 벽체와 기초부의 접합방법에 관계없이 충분한 횡하중 성능이 발휘되었다고 판단된다. 이들 값들은 기존 연구(Oh, 2021; Oh et al., 2021)에서 얻어진 결과($P_n/P_{n(ACI)} = 1.05 \sim 1.18$)와 유사한 수준에 있었다.

4.3 한계변형각에서의 성능(P_L/P_n , K_L/K_1 및 β_L)

P_L/P_n 는 δ_L 에서의 횡하중 저감 비율로서 PC 전단벽이 P_n 이후에 충분한 강도를 유지하고 있는지를 확인하기 위한 지표이다. ACI ITG 5.1-07(2007)은 P_L/P_n 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$P_L/P_n \geq 0.8 \quad (5)$$

식 (5)에서 나타난 바와 같이 PC 전단벽의 P_L/P_n 은 0.8 이상이어야 한다. Table 6 및 Figure 9(b)에 나타난 2CB 실험체의 P_L/P_n 은 0.896으로서 식 (5)에서 제시된 값보다 1.12배 높았다. 즉, A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강관 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB는 P_n 이후에도 충분한 강도를 유지하고 있다고 판단된다. 이 값은 기존 연구(Oh, 2021; Oh et al., 2021)에서 얻어진 결과($P_L/P_n = 0.81 \sim 1.0$)와 유사한 수준이었다. 4.1절에서 기술한 바와 같이 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 이거나 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체들의 변형 능력은 δ_L 에 도달하지 못하여 P_L/P_n 를 평가하지 못하였다. 하지만 Oh(2021)의 연구에 따르면 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 PC 전단벽의 P_L/P_n 은 0.64에 수준에 있었다.

K_L/K_1 는 δ_L 에서의 강성 저감 비율로, PC 전단벽에서 최대하중에 도달한 이후의 거동에서 충분한 강성을 유지하고 있는지를 확인하기 위한 지표이다. ACI ITG 5.1-07(2007)은 K_L/K_1 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$K_L/K_1 \geq 0.1 \quad (6)$$

(6)에서 나타난 바와 같이 PC 전단벽의 K_L/K_1 은 0.1 이상이어야 한다. Table 6 및 Figure 9(c)에 나타난 2CB 실험체의 K_L/K_1 은 0.286으로서 식 (6)에서 제시된 값보다 2.86배로 현저히 높았다. 즉, A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강관 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB는 P_n 이후의 강성저하

를 감소시키는데 효과적인 것으로 판단된다. 특히, 이 값은 기존 연구(Oh, 2021; Oh et al., 2021)에서 얻어진 결과($K_L/K_1 = 0.15 \sim 0.23$)보다 1.24배 이상 높았다. 이는 보조 띠철근으로 배근된 V-타이와 벽체와 기초부의 접합방법으로 사용된 강판 볼팅 공법이 크로스타이와 스플라이스 슬리브 공법에 비해 주철근의 좌굴을 지연시키고 접합부의 슬립 변위를 효과적으로 억제하기 때문이다. 이러한 경향은 Figure 8에서도 확인할 수 있었다.

β_L 는 δ_L 에서의 상대적 에너지 소산 비율로서 δ_L 에서 충분한 에너지 소산 능력을 확보하고 있는지를 확인하기 위한 지표이다. ACI ITG 5.1-07(2007)은 β_L 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$\beta_L = E_L / [(P_L^+ + P_L^-)(\delta_{KL}^+ + \delta_{KL}^-)] \geq 0.125 \quad (7)$$

여기서, E_L 은 δ_L 시점에서 형성된 이력루프에서 마지막 사이클의 에너지를, P_L^+ 및 P_L^- 는 각각 정방향 및 부방향에서 δ_L 시점의 횡하중을, δ_{KL}^+ 및 δ_{KL}^- 는 첫 번째 사이클의 초기강성과 P_L^+ 및 P_L^- 을 기준으로 형성된 평행사변형 영역에서 변위축과 만나는 점을 의미한다.

식 (7)에서 나타낸 바와 같이 PC 전단벽의 β_L 는 0.125 이상이어야 한다. Table 6 및 Figure 9(d)에 나타낸 2CB 실험체의 β_L 는 0.318로서 식 (7)에서 제시된 값보다 2.54배로 현저히 높았다. 즉, A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이며 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체 2CB는 일체형 전단벽과 동등 이상의 에너지 소산 능력을 가진다고 판단된다. 이는 기존 연구(Oh, 2021; Oh et al., 2021)에서 얻어진 결과($\beta_L = 0.19 \sim 0.32$)와 유사한 수준이었다. 이로부터 PC 전단벽에서 일체형 전단벽과 동등한 에너지 소산 능력을 확보하기 위해서는 A_{sh} 를 $2.0A_{sh(KDS)}$ 로 설계하고 벽체와 기초부의 접합방법으로 강판 볼팅 공법을 사용하는 것이 유리함을 확인하였다.

4.4 절대적 동등성 평가의 고찰

4.1절 ~ 4.3절에서 절대적 동등성 개념을 이용한 성능 평가 결과에 따르면, PLCSW 실험체들의 내진성능은 경계요소내의 구속효과와 기초접합부에서의 휨 전달력에 의해 중요한 영향을 받았다. PLCSW 실험체에서 경계요소내의 구속효과는 일반적으로 A_{sh} 를 증가시킴으로서 향상시킬 수 있지만, 벽체와 기초부의 접합에서 충분한 휨 전달력이 확보되지 않으면 A_{sh} 의 증가에 따른 구속효과의 향상이 미미함을 확인하였다. 3.4절 및 3.5절의 실험결과로부터 A_{sh} 를 $2.0A_{sh(KDS)}$ 으로 설계하였음에도 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 PLCSW 실험체의 μ_Δ 와 W_{80} 는 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 이고 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW 실험체보다도 오히려 각각 12.1% 및 3.44% 낮은 수준에 있었다. 특히, 이 실험체의 변형 능력은 ACI ITG 5.1-07(2007)에서 요구하는 $\delta_L (= 2.45\%)$ 보다도 작았다. 이러한 결과를 바탕으로 LWAC로 제작된 PC 전단벽은 기

초 접합방법으로서 강판 볼팅 공법을 적용하면 기초접합부에서 충분한 휨 전달력을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 한편, 3.1절의 실험결과로부터 보조 띠철근으로 V-타이를 배근한 PLCSW 실험체는 크로스타이를 배근한 PLCSW 실험체보다 코어 콘크리트 영역의 손상이 적었으며, V-타이의 벌어짐이 발생하지 않았다. 결과적으로 크로스타이를 대체하는 V-타이의 적용은 주철근의 좌굴을 지연시킬 수 있어 경계요소내 횡구속 효과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 위의 분석들로부터 LWAC로 제작된 PC 특수전단벽에서 ACI ITG 5.1-07(2007)에서 요구하는 내진성능을 확보하기 위해서는 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이상의 A_{sh} 와 기초 접합방법으로서 강판 볼팅 공법이 추천된다. 또한, 보조 띠철근으로서의 V-타이의 적용은 강판 볼팅 공법으로 접합된 PC 특수전단벽의 연성 능력 향상에 효과적이다.

5. 결 론

이 연구에서는 프리캐스트 경량골재 콘크리트 특수전단벽(precast lightweight aggregate concrete special shear wall, PLCSW)의 내진성능에 대한 경계요소내의 횡보강근 배근량(A_{sh})과 보조 띠철근의 종류, 그리고 벽체와 기초부의 접합방법에 의해 미치는 영향을 절대적 동등성 개념으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 벽체와 기초부의 접합방법으로서 강판 볼팅 공법은 스플라이스 슬리브 공법 보다 주철근의 좌굴시점을 지연시키고 잠재 소성힌지영역을 넓게 형성하였다. 또한, 경계요소내 보조 띠철근으로서 V-타이는 크로스 타이에서 일반적으로 관찰되는 후크의 벌어짐이 없었으며, 코어 콘크리트 영역의 손상을 줄이는데 효과적이었다.
- (2) 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 PLCSW 실험체의 최대내력(P_n) 이후 거동은 A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 임에도 하중이 급격히 저하하는 취성적인 경향을 보였다. 이에 반해, 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체는 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 임에도 P_n 이후의 거동이 완만히 저하되는 경향을 보였는데, 이러한 경향은 V-타이에서 가장 현저하였다.
- (3) PLCSW 실험체의 최대 휨 내력(M_n)은 보조 띠철근의 종류 그리고 벽체와 기초부의 접합방법에 관계없이 비슷한 수준을 보였으며, 모든 실험체에서 KDS 14 20 00에 의해 안전측으로 평가되었다.
- (4) A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이고 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW 실험체의 변위연성비(μ_Δ)는 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 인 실험체와 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체보다 각각 1.38배 및 1.18배 높았다. 특히 A_{sh} 가 $1.0A_{sh(KDS)}$ 로 설계되었음에도 보조 띠철근으로 V-타이가 배근되고 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW 실험체의 μ_Δ 는 A_{sh} 가 $2.0A_{sh(KDS)}$ 이고 스플라이스 슬리

브 공법으로 접합된 실험체보다도 1.21배 높은 수준이었다.

- (5) 누적 일손상지수(W_{80})는 보조 띠철근으로서 크로스타이가 배근된 실험체보다 V-타이가 배근된 실험체에서 1.11배 높았다. 또한, V-타이가 배근되고 강판 볼팅 공법으로 접합된 실험체의 W_{80} 는 A_{sh} 가 $1.0 A_{sh(KDS)}$ 으로 설계되었음에도 A_{sh} 가 $2.0 A_{sh(KDS)}$ 이고 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 실험체보다도 1.15배 높은 수준이었다.
- (6) 스플라이스 슬리브 공법으로 접합된 PLCSW 실험체는 A_{sh} 가 $2.0 A_{sh(KDS)}$ 로 설계되었음에도 ACI ITG 5.1-07에서 요구하는 절대적 동등성 개념의 구조성능을 만족하지 못하였다.
- (7) 강판 볼팅 공법으로 접합된 PLCSW 실험체는 A_{sh} 가 $2.0 A_{sh(KDS)}$ 로 설계되었을 때 ACI ITG 5.1-07에서 요구하는 절대적 동등성 개념의 구조성능을 모두 만족하였다. 절대적 동등성 개념의 구조성능에서 P_L/P_n , K_L/K_1 및 β_L 는 ACI ITG 5.1-07에서 제시된 값보다 각각 1.12배, 2.86배 및 2.54배 높았다.
- (8) NWC보다 취성적인 경향이 높은 전경량골재 콘크리트로 제조된 PLCSW 실험체는 ACI ITG 5.1-07에서 요구하는 내진성능을 만족할 수 있는 수준의 충분한 휨 전달력과 연성을 확보하기 위해 $2.0 A_{sh(KDS)}$ 이상의 A_{sh} 와 기초 접합방법으로서 강판 볼팅 공법이 요구된다.

REFERENCES

1. ACI 318 (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA.
2. American Concrete Institute (ACI) (2007). *Acceptance criteria for special unbonded post-tensioned precast structural walls based on validation testing and commentary*. ACI ITG-5.1-07, Detroit.
3. ASTM C 469/C 469M-14 (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. West Conshohoken, PA; ASTM International.
4. FEMA (2003). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations For New Buildings and other Structures (FEMA 450)*. Washington, D.C.; Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency (FEMA).
5. Chun, Y. S. (2015). Seismic Performance of Special Shear Wall with the Different Hoop Reinforcement Detail and Spacing in the Boundary Element. *LHI Journal*, 6(1), 11-19.
6. KCI (2021). *Design of Concrete Structures (KDS 14 20 00: 2021) and Commentary*. Seoul, Korea: Kimoonang Publishing Company. Korea Concrete Institute (KCI).
7. Kim, Y. J., Choi, Y. W., & Lachemi, M. (2010). Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(1), 11-16.
8. Kim, W. W., Mun, J. H., & Yang, K. H. (2015). Simplified model for the stress-strain relationship of confined concrete. *Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure & Construction*, 31(4), 79-86.
9. Kim, W. W., & Yang, K. H. (2015). Effect of bending angle and embedment length on the bond characteristics of V-shaped tie reinforcement. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 15(5), 465-471.
10. Lee, K. H. (2018). *Reliable Model Proposals for Mechanical Properties and Mixing Proportioning of Lightweight Aggregate Concrete using Expanded Bottom Ash and Dredged Soil Granules*. Ph.D. Thesis, Kyonggi University.
11. Lee, K. H., & Yang, K. H. (2018). Proposal for compressive strength development model of lightweight aggregate concrete using expanded bottom ash and dredged soil granules. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 34(7), 19-26.
12. Lee, H. J., Yang, K. H., & Kwak, M. K. (2017). Evaluation on the effectiveness of supplementary V-ties on flexural ductility of reinforced concrete columns. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 29(4), 345-351.
13. Lee, H. J., Kim, S., Kim, H. Y., Mun, J. H., & Yang, K. H. (2022). Empirical equation for mechanical properties of lightweight concrete developed using bottom ash aggregates. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(23), 1-10.
14. Mun, J. H. (2014). *Flexure and Shear Design Approach of Heavy-weight Concrete Shear Walls*. Ph.D. Thesis, Kyonggi University.
15. Nam, B. R. (2016). *Structural Capacity of Mortar-filled Head Splice Sleeve*. Ph.D. Thesis. Korea National University of Transportation.
16. Oh, N. K. (2021). *Evaluation on Seismic Performance of Precast Lightweight Concrete Shear Walls*. MS. Thesis. Kyonggi University.
17. Oh, N. K. (2022). Flexural Ductility of Lightweight Aggregate Concrete Shear Walls with Boundary Element. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 34(4), 345-351.
18. Oh, Y. H., Moon, J. H., Kim, T. K., Lee, J. H., & Shin, S. H. (2021). Structural behavior and seismic resisting performance of double walls as PC special shear walls. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 33(1), 65-73.

19. Pan, G. B., Cai, J., He, A., Chen, Q. J., Zuo, Z. L., He, B. Q., Tang, X. L., & Wu. H. W. (2021). An experimental study of the seismic behaviour of precast concrete shear walls with bolted-plate connections. *Engineering Structures*, 248, 1-19.
20. Seo, S. Y., Kim, S. H., Cha, J. W., & Lim, B. H. (2020). Seismic capacity of precast concrete wall corresponding to connection detail of vertical bars at horizontal joint. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 32(6), 541-551.
21. Sheikh, S. A., & Khoury, S. S. (1997). A performance-based approach for the design of confining steel in tied columns. *ACI Structural Journal*, 94(4), 421-432.
22. Song, J. W., Chun, Y. S., Song, J. K., & Yang, K. H. (2018). Seismic performance of special shear wall with special boundary element confined by overlapping hoops. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(1), 47-58.
23. Watson, S., & Park, R. (1994). Simulated seismic load tests on reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, 120(6), 1825-1849.
24. Yang, K. H. (2015). *Development of a simplified V-shaped ties for seismic design of reinforced concrete columns*. Technical Report, Kyonggi University.
25. Yang, K. H. (2016). Lateral confinement effectiveness of V-shaped supplementary ties in RC columns subjected to axial compressive loads. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 32(3), 11-18.
26. Yang, K. H., Lee, Y. H., Kwak, N. H., & Chung, H. S. (1999) A Study on the Effectiveness of Hook Type of Crossties in the Flexural Behavior of Confined Concrete Columns. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 15(9), 63-70.
27. Yang, K. H., Mun, J. H., Kim, S., Im, C. R., & Jung, Y. B. (2023). Flexural behavior of precast lightweight aggregate concrete shear walls with different wall-to-base connections. *Engineering Structures*, 297, 1-19.
28. Yang, K. H., Mun, J. H., & Oh, N. K. (2023). Flexural behavior of precast lightweight concrete shear walls. *ACI Structural Journal*, 120(2), 217-231.
29. Yang, K. H., Mun, J. H., Kim, S., Im, C. R., & Jung, Y. B. (2023). Seismic performance of precast lightweight aggregate concrete shear walls with supplementary V-ties. *Engineering Structures*, 297, 1-19.
30. Zhi, Q., Yuan, Z., Zheng, Y., Jia, L., & Guo, Z. (2024). Experimental research on seismic performance of precast concrete shear walls with a novel grouted sleeve used in the connection. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(5), 1379-1403.

(Received Dec. 6, 2024/ Revised Jan. 2, 2025/ Accepted Jan. 13, 2025)