

탄소중립 실현을 위한 조립 해체가 용이한 보-기둥 접합부의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of an Easy to Rapid Disassembly Beam-Column Connection for Carbon Neutrality

○최형진* 김영주** 배재훈***
Choi, Hyeong-Jin Kim, Young-Ju Bae, Jae-Hoon

Abstract

The increasing demand for carbon neutrality is influencing construction practices. This research introduces the Box Column-H-Beam Connection (CNDC) system, designed to promote carbon neutrality by focusing on easy disassembly and enhanced durability through seismic testing. The CNDC's modular design enables rapid, weld-free assembly, enhancing efficiency and component reuse. The results demonstrated that all proposed specimens exceeded a 5% rotation angle and showed approximately 21% higher stiffness compared to the specimens, thereby confirming their superior seismic performance.

키워드 : 탄소중립, 철골 구조, 보-기둥 접합부, 모듈식 구조, 반복가력 실험

Keywords : Carbon Neutrality, Steel Structure, Beam-Column connection, Modular Connection, Cyclic Loading Test

1. 서론

국제사회는 지구온난화 및 기후변화 문제에 대응하기 위해 1992년 유엔기후변화협약(UNFCCC), 1997년 교토의정서를 체결했고, 기존 체제의 한계를 보완해 2015년 파리협정을 통해 신기후체제를 수립하며 전 산업에 걸쳐 탄소중립을 실현하기 위해 체계적인 이행을 시도하고 있다^[1].

정부는 전체 에너지 소비의 약 40%를 차지하고 있는 건설 부문에서 30년 배출량 중 35.8백만 톤(감축률 18.1%)을 감축하도록 명시하였다^[2]. 이러한 맥락으로 대한건축학회에서 건설산업의 전생애주기적 평가방식(Lifecycle Assessment, LCA)으로 내재탄소배출량(Embodied Carbon Emission) 산정방법과 이를 적용함에 있어서 「탄소중립 설계 지침서」를 발간하며 정량화 방법과 실무차원에서 적용성을 높였다^[3].

Reuse 구조는 보, 기둥과 같은 주요 구조부재를 조립공법으로 단기간에 조립하고 해체 후 주요 구조부재를 재사용하여 장수명화를 이루는 구조시스템이다^[4]. 이러한 시스템을 선정하면 전생애주기인 자재단계(A1-A3), 시공단계

(A4-A5), 보수 및 교체(B3-B5) 폐기단계(C1-C4), 재생단계(D)에서 탄소배출량을 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 건물이 장수명화가 될수록 지진을 경험할 확률이 증대되고 이에 대한 내진성능 확보가 필요하다^[5].

휨모멘트와 비틀림의 효과적인 특징을 갖는 박스형 강관기둥은 폐쇄된 단면의 특성으로 내력 효율성의 장점과 콘크리트 충전이 가능하여 대형 구조물과 지진이 많이 발생하는 지역에서 많이 사용한다^[6-7]. 기둥 강관과 H형강보의 응력 전달 과정에서 외다이어프램형, 내다이어프램형과 관통형 다이어프램의 세 가지 방법을 실무에서 주로 사용하고 있지만, 세 가지 다이어프램의 제작 시, 절단과 용접의 번거로움이 있어 품질과 시공성이 떨어지고 콘크리트 충전시 어려움이 있다^[8].

본 연구에서는 건축물의 탄소중립 목표 달성을 위해, 현장에서 볼트만을 이용해 신속하게 조립 및 해체가 가능한 보-기둥 모듈러 접합 시스템(Carbon Neutrality Dismantle Connection, CNDC)을 제안한다. 이 시스템은 현장에서의 추가적인 용접이 필요 없어 시공 효율성이 높으며, 각 부재는 모듈성을 가져 운반 효율성 및 품질이 좋고 부재 재사용성이 우수한 것이 특징이다. 이에 본 연구에서는 CNDC 접합 시스템의 실험을 통해 내진성능을 검증하고자 하였다.

2. TZcon을 사용한 CNDC 시스템 소개

2.1 상세개발 기준연구결과

* 전남대학교 대학원 석사과정

** 한국건축구조연구원 대표, 공학박사

*** 전남대 건축디자인학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Design, Chonnam University, skycity-bjh@chonnam.ac.kr)

이 연구는 2022년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호:NRF-2022R1C1C1003594

Lee et al.의 연구에서, 기둥과 구속된 H형강 보 응력분포에서 수직 kinks 현상을 확인되었고^[9], 이는 기존 전통적인 보 이론과 다름을 시사한다. 기둥으로의 보로 하중전달 과정에서 보 웨브 중앙부가 아닌 플랜지에서 전단응력과 휨응력의 대부분을 저항할 필요가 있음을 보여주고 있다. 제안된 CNDC시스템의 사다리꼴형 접합부(이하“TZcon”) 형상은 Lee et al.의 응력 및 하중전달 메커니즘에 따라 보 중앙부 연결하지 않고 플랜지에서 저항하는 트러스 이론(Truss Analogy)에 따라 고안되었다.

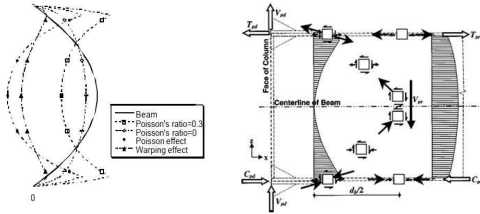


그림 1. 응력분포 및 Truss Analogy 하중전달 메커니즘

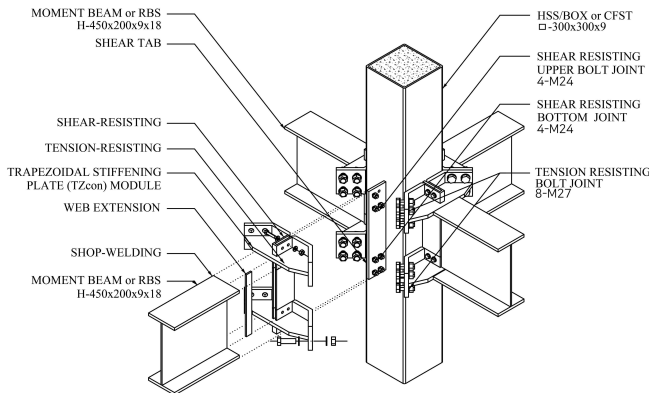


그림 2. CNDC 시스템의 상세

2.2 CNDC 시스템의 시공과정

그림 3은 CNDC 접합시스템의 시공과정을 나타낸다. 공장에서 각각 TZcon 과 H형강, 각형강관과 시어탭을 용접하여 사전제작한다(그림 3.a). 부재는 운송되어 현장에서 수직 슬라이딩 방식으로 기둥의 용접된 전단탭과 TZcon의 홈에 끼운 후 총 4개의 M24 볼트로 체결된다(그림 3.b). 같은 방식으로 체결하고 모서리 플레이트와 서로 맞닿는 면에 M27 볼트로 체결한다(그림 3.c). 따라서 CNDC 시스템에서 최종적인 볼트 체결은 다음과 같다: TZcon이 용접된 H형강 보에 대하여, 각 TZcon의 모서리 플레이트마다 4면에 M27 볼트 4개씩 총 16개를 사용한다. 또한, 전단탭과 TZcon 수직 플레이트 체결에서 M24 볼트 8개를 사용한다(그림 3.d).

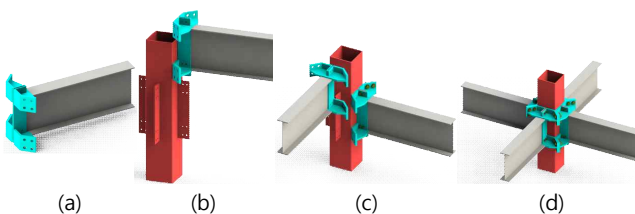


그림 3. CNDC 시스템의 시공과정

3. 실험계획

3.1 실험체 계획

본 연구에서는 4개의 접합부 실험체(CNDC-450, CNDC-500, CNDC-500R, CNDC-500W) 와 전통적인 외다이아프램을 가진 비교 실험체(EXT-450C)을 제작하였다. 또한 TZcon의 접합 개소에 따른 성능 비교를 위해 한면에 만 보를 갖는 실험체(CNDC-500W)를 제작하였고 다른 시험체들은 네면에서 보를 갖는 TZcon에 수직요소가 포함된 실험체를 제작하였다. 또한 RBS 단면을 갖는 실험체(CNDC-500R)를 포함하였다.

기둥 강관, 보 플랜지 및 웨브, TZcon 플레이트, 외다이아프램에 사용된 플레이트 두께에 따라 소재시험을 진행하였다. 강종은 기둥은 SRT275이고 나머지는 SS275로 동일하며 소재시험편은 한국산업규격(KS B 0801)에 따라 두께별 3개씩 제작하였다. 강재의 소재시험결과는 표 1와 같이 강종 별로 모든 사양을 만족하였다.

표 1. 강재의 소재시험 결과

Specimens	Thickness (mm)	Steel grade	F _y (MPa)	F _u (MPa)	Elong. (%)	Yield ratio (%)
Column	9	SRT275	392.51	481.50	20.73	81.52
Beam, Stiffeners	9	SS275	291.80	448.55	30.82	65.05
Beam, Diaphragm	18		288.37	444.18	30.86	64.92
Shear tab	15		275.89	433.83	31.53	63.59
Stiffeners	22		281.44	451.43	30.65	62.34

3.2 실험체 셋업

그림 4는 실험체 전경을 보여주며, 기둥 상단과 하단을 반력벽에 힌지로 고정하고, H형강보의 국부 변형을 방지하기 위해 스티프너로 보강하였다. 또한, 횡비틀림좌굴 방지를 위해 기둥에서 2,000mm 떨어진 곳에 횡지지대를 설치하였고 3,500mm 떨어진 곳에서 3,000kN 용량의 액추에이터로 0.5mm/sec의 속도로 가력하였다. 층간 변위각(SDR)은 보 끝단 변위와 기둥 중심축까지 길이의 비로 정의했다. 변위 제어하의 반복 가력 실험은 최대 6% 층간 변위각에서 수행되었으며, 최대 하중의 85% 이하로 감소 시 실험을 중단하였다.

가력점 밑으로 보 단부의 처짐을 계측하기 위해 줄 변위계(Wire gauge)를 설치하였고 접합부 상단 및 보 플랜지 및 웨브에 인장, 압축력에 변형 정도를 파악하기 위해 스트레인 게이지를 부착하였다.

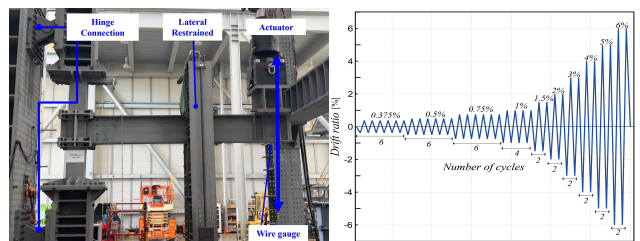


그림 4. 실험체 셋업 전경 그림 5. Cyclic Loading Program(SAC 2000)

4. 실험결과 및 분석

4.1 파괴형상

4개의 실제 크기의 CNDC 실험체의 종국상태 파단은 그림 6에서 보여준다. 주요 관찰을 설명하기 위해 시편 CNDC-450을 사용하였다. $\theta=0.02$ 전까지는 뚜렷한 변형이 없었고 $\theta=0.03$ 에서 TZcon 부근 플랜지 부분에서 페인트가 약간 벗겨지며 부풀어 오르는 현상이 발견되었다. $\theta=0.04$ rad에서는 TZcon으로 둘러진 기둥 면이 부푸는 현상과 하부플랜지와 접합부 사이에 용접부에서 미세한 균열이 발생하였다. $\theta=0.06$ 첫 번째 사이클에서 플랜지의 변형이 급격히 증가하였고 용접부를 따라 균열이 증가하면서 하중이 감소하였고 마지막 상향가력에서, 하부플랜지 부근부터 TZcon의 수직 플레이트로 관통하는 파단이 발생하여 실험을 종료하였다. 나머지 실험체도 용접부에서 파단이 발생하였고 유사한 파괴 양상을 보였다.

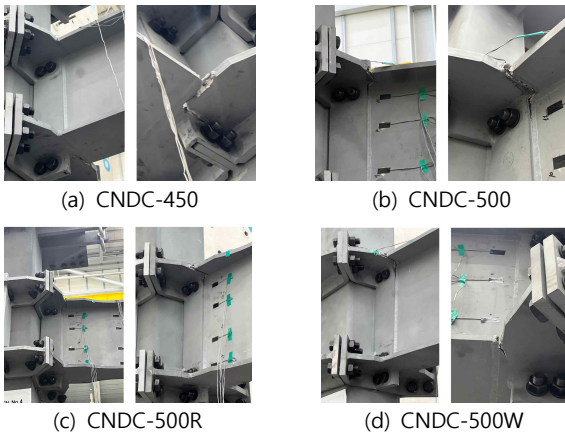


그림 6. 종국상태 파단형상

4.2 모멘트-회전각 관계

의사정적 반복 하중을 가하는 내진성능실험에서 KDS 41 17 00의 특수모멘트골조의 접합부로서 인정되기 위해서는 0.03 rad 소성회전각 수준 (또는 4% 층간변위각 수준)을 적어도 1사이클 저항할 수 있어 하고, 동시에 강도 저하율이 원단면의 공칭소성모멘트의 80%이하로 발생해서는 안된다^[10]. 그림 7은 각 시편의 모멘트-회전 곡선이다. y축은 보 원단면의 공칭 소성모멘트($M_{pn}=F_y Z_b$)로 나누어 정규화한 값이고 x축은 층간변위각이다. CNDC 전체 실험체는 모멘트 회전각 관계에서 0.04 rad 일때, M_{max}/M_{pn} 의 값이 0.8이상을 만족하였고 모두 5%이상의 회전각을 가지며 우수한 성능을 가졌다. 하지만 EXT-450 실험체와 달리 히스테리시스 곡선에서 편칭현상이 나타났다. CNDC 실험체는 표 2에 나타난 것과 같이 전소성모멘트에 대한 최대 모멘트비(M_{max}/M_{pn})는 1.19로 CNDC-500 실험체가 가장 컸고 0.93으로 CNDC-500R 실험체가 가장 낮았으며, EXT-450C 실험체와 비교하면 1.1~1.23 배 차이 나는 값을 나타냈다.

그림 7(f)에 전 실험체의 포락곡선을 하나의 그래프에 나타냈다. 곡선은 탄성, 탄소성, 소성, 파단영역 포함한다. CNDC 실험체 대부분 초기 하중이 가해지며 선형성을 띄며 탄성상태를 나타냈고 점진적으로 기울기는 0.02 rad-0.03 rad에서 감소되며 변곡점을 나타냈다. 이는 탄소성단계에 진입함을 나타낸다. 보 치수가 450mm인 경우 상하향 평균 극한강도는 비교실험체에 대비 약 29kN의 차이 높았고 소성-파단영역에서 비교실험체는 두드러진 변곡점을 가지며 내력이 떨어졌지만 CNDC 실험체는 전반적으로 내력이 점진적으로 증가하며 파단이 났다. 비교실험체에 비해 접합부의 우수한 강성을 가졌음을 알 수 있다.

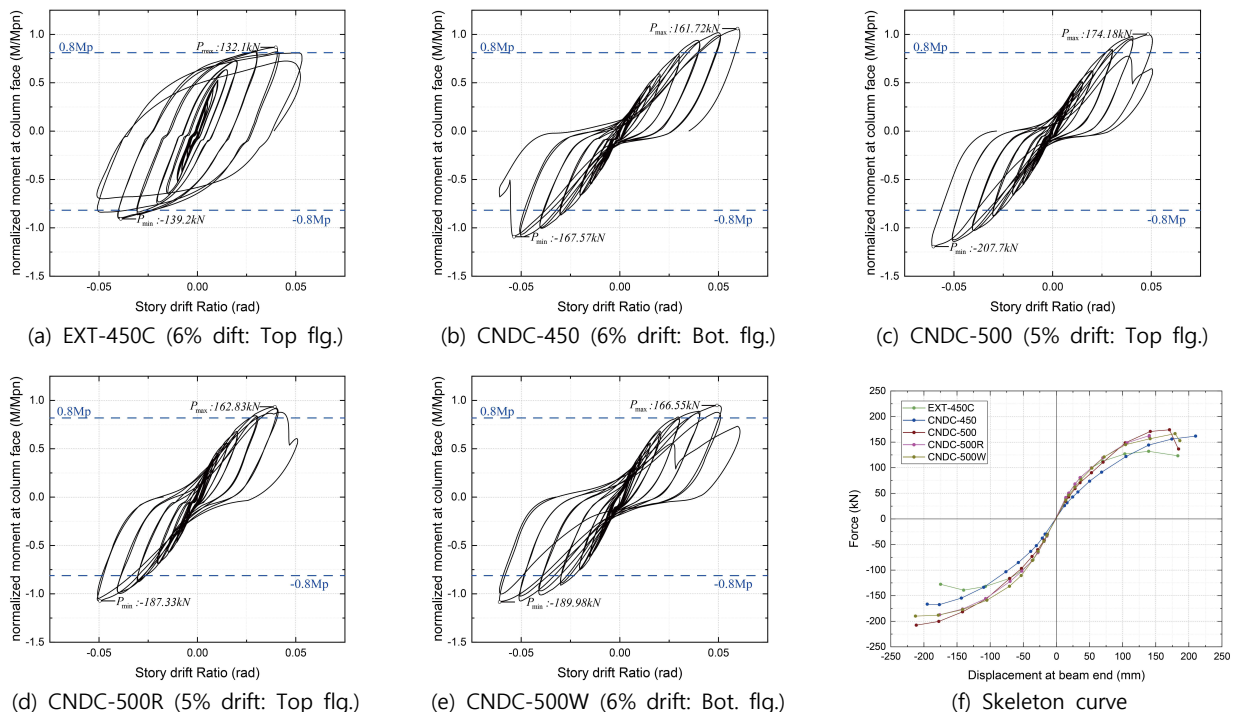


그림 7. 모멘트-회전각 관계

4.3 초기강성

그림 8은 반복가력에 따른 강성저하를 그래프로 나타낸 것이다. x축은 각 가력단계의 정·부 모멘트의 강성을 초기 정·부 모멘트의 평균값($K_1=(K_{1+}+K_{1-})/2$)으로 나누는 것으로 초기 강성에 대한 비(K_i/K_1)이며, y축은 가력단계이다. 강성저하는 CNDC-450 실험체가 낮고 EXT-450 실험체가 가장 크다. 초기강성에서부터 약 18% 가량 큰 차이를 보이며, 강성 저하율도 나머지 실험체에 비해 EXT-450C 실험체가 대체로 크다는 것을 알 수 있다.

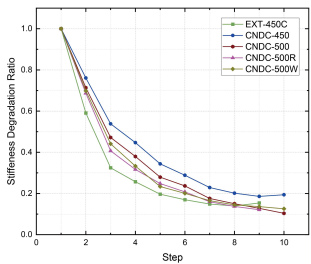


그림 8. 초기 강성저하 비교

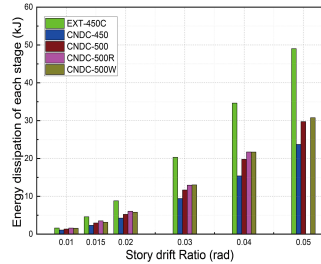


그림 9. 주기별 에너지 소산량

표 2. 각 실험체 실험결과

Specimens	M^+_{max} (kN·M)	M^-_{max} (kN·M)	θ^+_{max} (%)	θ^-_{max} (%)	M^+_{max} / M_n	M^-_{max} / M_n
EXT-450C	462.4	-487.2	5.3	-5.1	0.87	0.91
CNDC-450	566.0	-586.5	6.1	-6.1	1.06	1.1
CNDC-500	609.6	-727.0	5.1	-5.1	1	1.19
CNDC-500R	569.9	-655.7	5.1	-6.1	0.93	1.07
CNDC-500W	582.9	-664.9	6.1	-6.1	0.95	1.09

4.4 에너지 소산량 및 변형 분석

반복 하중 사이클의 첫 사이클에서 히스테리시스 곡선의 면적을 통해 접합부의 에너지 소산 능력을 평가할 수 있다. 이는 그림 9에 나타나있으며, CNDC-450은 핀칭 현상이 발생으로 EXT-450C 시편 대비 약 64% 수준의 에너지 소산 능력을 보여주었다. CNDC-500W는 총 에너지 소산 용량이 77.96kN·M로 가장 높았고, CNDC-500R은 총 변위각 5% 첫 사이클에서 파단으로 47.66kN·M로 가장 낮았다. CNDC-450은 주기별 총 변위각에서 상대적으로 낮은 에너지 소산 용량을 보였다.

그림 10은 각 하중 사이클 변형량의 최댓값을 나타내고 우측 상단에 게이지 부착위치도를 포함한다. 게이지는 접합부 상단 좌우(CF1, CF2)와 보 플랜지 상단(BF1~BF4), 보 웨브(BW1, BW2)에 부착하였다. $\theta=0.01$ 에서 CNDC 실험체는 대부분 탄성 단계에 있었으며, BF1 지점이 먼저 항복하였다. 보의 변형은 웨브에서 보다 플랜지에서 주로 관찰되며 이는 기대한 트러스 이론과 유사함을 알 수 있다.

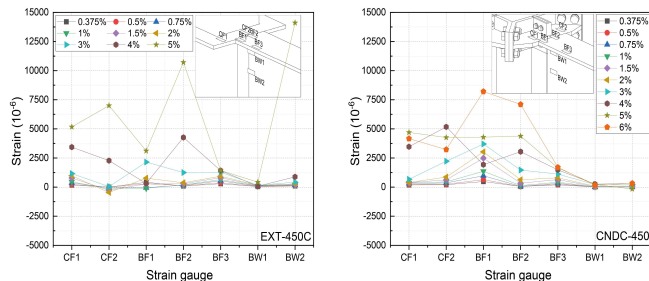


그림 10. 주기별 변형 분석

5. 결론

본 연구에서는 탄소중립 실현을 위한 모듈러 접합부 및 혁신적인 보-기둥 시스템을 제안하고 실험형 내진성능 실험을 진행하였다. 주요 결론 요약은 다음과 같다.

1) CNDC 실험체는 기존 외다이어프램 실험체와 비교했을 때 정·부 모멘트 구간에서 최대 0.04 rad 까지 80% 이상 상회하는 전소성모멘트를 나타내어 KDS 41 17 00의 특수모멘트골조에서 요구하는 내진 성능을 확보하였다.

2) 시험체의 제작 과정에서 접합부 코너 TZcon 사이의 5~8mm가 이격이 발생한 상태로 시험은 진행되었고, TZcon 접합부분이 완전히 고정되지 않아, 반복가력시 접합부의 탈착현상에 의한 핀칭현상을 보였다. 이로 인해, 에너지 소산능력에서 비교실험체 외다이어프램에 비해서 에너지 소산능력은 상대적으로 저하되는 결과를 얻었다.

본 연구에서는 CNDC 시스템이 충분한 강성과 내진성능이 가지고 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다. 향후, 핀칭현상의 원인을 해결하고자, 유한요소해석을 활용한 접합부 상세 개선과 추가적인 이론적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- Hermwille, L., 2016: Climate Change as a Transformation Challenge. A New Climate Policy Paradigm? GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, 25(1), 19-22, doi:10.14512/gaia.25.1.6.
- 2050 장기저탄소발전전(LEDs)-지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략, 관계부처 합동, 2020.
- 대한건축학회 탄소중립위원회 「탄소중립 설계 지침서」. 기문당, 2022
- 유홍식, 김진원, 김영주, 오상훈.(2013).재사용 구조시스템의 개발 및 적용.한국강구조학회지,25(1),32-37.
- Charleston, A. (2008). Seismic Design for Architects (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080888255>
- Sherman, D. R. (1996). Designing with structural tubing. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction, 33, 101-109.
- Wu, L., Chung, L., Tsai, S., Shen, T., & Huang, G. (2005). Seismic behavior of bolted beam-to-column connections for concrete filled steel tube. Journal of Constructional Steel Research, 61(10),1387-1410.
- Shin, K., Kim, Y., Oh, Y., & Moon, T. (2004). Behavior of welded CFT column to H-beam connections with external stiffeners. Engineering Structures, 26(13), 1877-1887. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.06.016>
- Lee, K. H. (1998). Boundary effects in welded steel moment connections. University of Michigan.
- KDS (2019). Seismic Design Code of Buildings (KDS 41 17 00: 2019), Korean Design Standard