

철골 모멘트골조 내진보강공법 간접접합부의 전단내력평가를 위한 실험적 연구

김선웅^{1*}

¹부교수, 영산대학교, 건축공학과

Experimental Study on Shear-Resistant Capacity of Indirect Connection for Seismic Retrofit Using Steel Moment Frames

Kim, Seonwoong^{1*}

¹Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Youngsan University, Yongsan, 50510, Korea

Abstract - In order to evaluate the seismic performance of buildings strengthened by embedded or perimeter steel moment frames with the indirect connection, a numerical analysis model for the shear-resistant capacity of the indirect connection is required. However, the Korean structural building codes have not been able to present a design plan about the shear-resistant capacity of the indirect connection of a specific seismic retrofitting method. In this study, an experiment was conducted to investigate the shear-resistant capacity of indirect connections of the WAS seismic retrofitting method. The major structural components of indirect connections against the shear force were identified. The unified shear-resistant capacity of indirect connections was suggested regardless of the construction type. Furthermore, a method for calculating the shear-resistant capacity according to the number and the thickness of the load transfer components of indirect connections was proposed.

Keywords - Seismic retrofit, Steel moment frames, Connection, Experiment, Anchor, Shear-resistant capacity

1. 서론

1980년대 후반 이후 우리나라에서는 지진관측망의 확대 및 지진분석 시스템의 성능 향상으로 규모 2-3의 지진 감지횟수가 증가하여 총 발생횟수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 2000년대 이후에는 총 발생횟수의 뚜렷한 증가세는 보이지 않으나, 2016~2017년 912 경주지진 및 포항지진으로 발생횟수가 크게 증가하였다. 최근 2019년 국내 지진(규모 2 이상) 발생횟수는 총 88회로 2016년 252회, 2017년 223회, 2018년 115회 이후 네 번째로 많은 지진이 발생

하였다. 규모 3 이상의 지진은 연평균 10.9회보다 많은 14회가 발생하였으며, 사람이 진동을 느낀 유감지진은 16회 발생하였다^[1].

한편, Neria *et al.*^[2]은 대부분의 연구에서 자연재난을 경험한 경우에 외상 후 스트레스 장애(post-traumatic stress disorder)가 약 20% 내외로 발병하였다는 보고가 있다고 주장하였다. 우리나라에서도 경주지진 및 포항지진 이후에 지역 내의 심리상담횟수는 각각 2,498건 및 9,086건이 이루어졌으며, 이 중에서 포항주민 425명은 정신건강 고위험군에 속하는 것으로 나타났다. 한반도는 판의 경계로부터 수백 km 떨어진 판 내에 위치하여 지진의 안전지대로 인식되어 왔기 때문에 광범위한 지역에서 큰 규모로 발생한 두 지진은 해당지역 주민들에게 심리적으로 상당한 충격을 주었음을 알 수 있다^[3]. 즉 자연재난에 대한 시설물의 구조적 안전성의 확보는 건물이 시민에게 제공하는 고유의 목적인 “거주의 안정성”을 달성하기 위한 기본요구사항임을 재차 확인할 수 있다.

Note.-Discussion open until June 30, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 13, 2020; revised October 28, 2020; approved on November 03, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-55-380-9497 Fax. +82-55-380-9249

E-mail. seonwoong.kim0428@gmail.com

이러한 국가적 요구의 일환으로 우리나라는 최초로 1988년 건축물의 내진설계기준을 제정하였다. 경주지진 및 포항지진을 계기로 대부분의 신축건물에 대한 내진설계의 도입 및 내진설계가 반영되지 않은 공공시설물 및 학교시설에 대한 내진보강사업이 활발히 진행되고 있으며^[4], 이에 대한 사회적 요구에 따라 다양한 내진보강기술이 개발되고 있다.

Kim and Lee^[5] 및 Kim^[6]은 2층 철근콘크리트 골조를 대상으로 실물대 실험을 통해 철골조를 활용한 내진보강공법의 효과를 조사하였으며, 내진보강공법에 대한 설계식을 제안하였다. Lee *et al.*^[7]은 유사동적실험을 통해 철골조를 활용한 내진보강공법의 유효성을 검증하고 유사동적실험의 필요성을 논하였다. Jung *et al.*^[8]도 철골조를 활용한 내진보강공법에 대한 반복가력실험 및 수치해석을 수행하여 내진보강공법의 성능을 검증하였다. Shin *et al.*^[9]은 수치해석을 통해 강재슬릿댐퍼를 이용한 필로티 건축물의 내진성능평가를 수행하였다. Lim^[10]은 원형 개구부를 가지는 전단지배 하이브리드 강재 연결보에 대한 실험을 수행하여 내진성능 효과를 확인하였다. Lee *et al.*^[11]은 유닛플로어 시스템을 제안하고 유닛플로어 시스템의 보-기동 접합부에 대한 실험을 통해 내진성능을 평가하였다.

우리나라에서는 미국^{[12],[13]} 및 일본기준^[14]에 기초하여 국내실정에 부합되도록 마련한 학교시설 내진설계기준^[15](이하 기준)과 기준에 근거하여 실무를 수행하기 위한 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼^[16](이하 매뉴얼)이 국가 내진보강사업의 원활한 진행을 위해 전문가 집단의 요구에 의해 제정되었다. 기준 및 매뉴얼은 다양한 시스템 보강방안에 따른 내진성능평가 방안 및 제반사항을 제시하고 있다.

후설치 앵커를 활용한 기존 철근콘크리트 골조와 보강 철골조간의 직접접합방식은 후설치 앵커 설치시에 기존 철근콘크리트 골조에 매입된 전단철근의 간섭이 발생할 수 있다. 아울러 후설치 앵커의 수직도를 확보하기 어렵다. 본 연구에서는 직접접합방식의 철골 끼움골조 및 모멘트골조를 활용한 내진보강공법의 문제점을 개선한 간접접합방식의 WAS 내진보강공법에 대해 다루고 있다.

기준 및 매뉴얼에 근거하여 내부 매입형 철골 끼움골조 및 외부 부착형 철골 모멘트골조 WAS 내진보강공법을 적용하기 위해서는 시설물에 대한 공학적 수치해석모델 작성에서 필요한 간접접합부의 전단내력을 요구한다. 본 연구에서는 WAS 내진보강공법 간접접합부의 전단내력을 파악하기 위한 실험을 수행하고 수치해석모델 적용방안을 제시하고자 한다.

2. 내진보강공법의 정의 및 수치해석모델

2.1 내진보강공법의 정의

기준은 시스템 보강공법 중에서 모멘트골조공법을 철골조를 기존 골조 내부에 매입하는 철골 끼움골조(embedded or window-type steel moment frame) 공법과 철근콘크리트, 철골철근콘크리트 또는 철골조를 외부에 설치하는 모멘트골조(exterior-type steel moment frame) 공법으로 구분한다. 매뉴얼은 구분된 두 가지 공법에 대한 상세한 내진보강설계 방안을 각각 제시하고 있다.

2.2 내진성능평가를 위한 수치해석모델 작성 방안

본 절에서는 철골 끼움골조 및 모멘트골조를 활용한 내진보강공법의 수치해석모델 작성 방안을 알아보고 본 연구의 목적을 확인코자 한다.

2.2.1 철골 끼움골조

매뉴얼은 철골 끼움골조를 활용한 철근콘크리트 골조의 접합방식을 직접접합과 간접접합으로 구분하며, Fig. 1은 철골 끼움골조를 활용한 수치해석 모델 예를 보여준다. 내진성능평가를 위한 철골 끼움골조의 수치해석모델의 요구사항은 다음과 같다.

- (1) 보-기동 접합부의 인장력은 기존 골조의 기동에 의해서만 전달된다.
- (2) 기존 골조와 철골 끼움골조를 결합하는 접합부는 압축력과 전단력만을 전달한다.
- (3) 선형 및 비선형해석에 모두 사용할 수 있다.

이와 같이 철골 끼움골조를 활용하여 내진보강한 시설물의 수치해석모델을 작성하기 위해서는 접합부의 전단력을 파악하여야 한다. 매뉴얼은 전단력을 건축구조기준에 근거하여 산정하기 어려운 경우에 전단력은 후설치 앵커에서 비롯된 계면전단력(interfacial shear force)에 의해 결정되는 것으로 가정하며 15장 기준부재-보강재 연결부에 따라 설계하도록 권고하고 있다. 단, 실험적 증명을 통해 접합부의 전단력을 검증한 경우에는 실험값을 적용할 수 있다고 기술하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통해 간접접합부를 가지는 WAS 내진보강공법에 대한 접합부의 설계전단력을 지정하고자 한다.

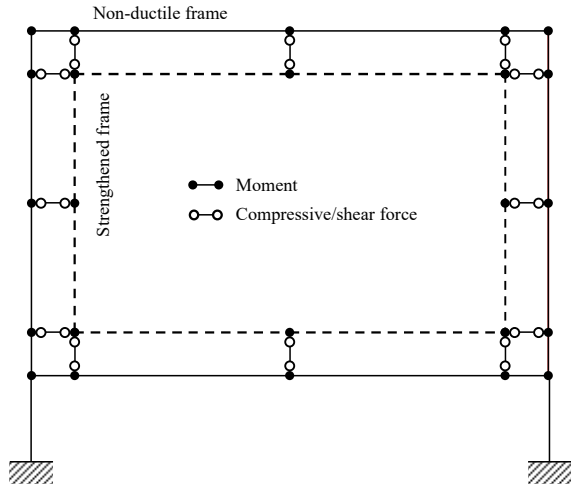


Fig. 1. Example of a numerical model for window-type steel moment frames per manual^[11]

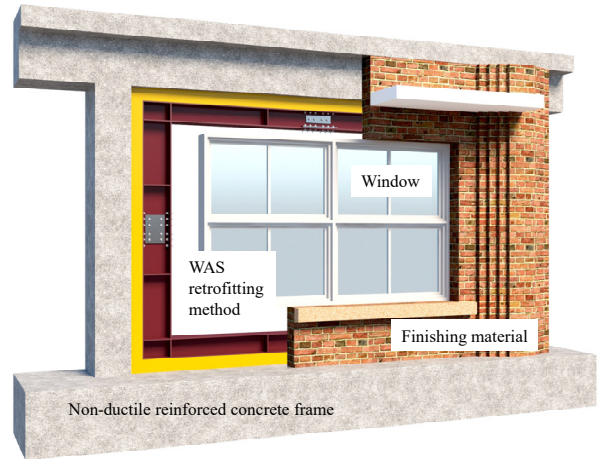
2.2.2 모멘트골조

매뉴얼은 철골 끼움골조 및 모멘트골조의 내진보강설계 방안을 구분하고 있으나, 내진보강재의 접합형태(내부매입형 또는 외부부착형)만 다를 뿐 접합부의 설계방안 및 골조의 내진성능평가방안은 동일하다.

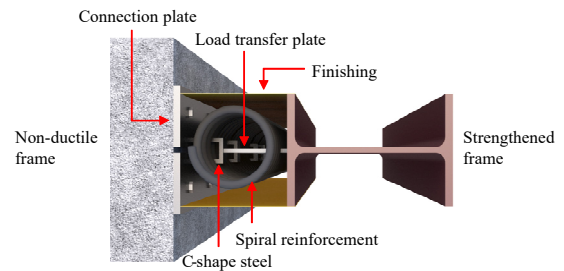
3. WAS 내진보강공법 개요

WAS 내진보강공법은 내진상재가 반영되지 않은 철근콘크리트 골조를 내부매입형 철골 끼움골조 및 외부부착형 철골 모멘트골조를 활용하여 내진보강하는 공법이다(Fig. 2(a) 참조). 철골 끼움골조를 적용할 경우, 기존 철근콘크리트 기둥과 보에 복수의 접착보강판(connection plate)을 후설치 앵커를 이용하여 기존 골조의 전단철근과의 간섭을 회피할 수 있는 위치에 설치한 후에 ㄷ형강(C-shape steel)을 현장 용접한다. ㄷ형강과 하중전달판(load transfer plate)은 공장 용접하여 제작한다. 보강 철골조는 배면에 하중전달판을 현장용접하여 연결한다. 용접은 모두 그루브용접을 한다. 접착보강판과 보강 철골조의 배면 사이에는 무수축 몰탈(non-shrinkage mortar)을 충전하고 몰탈의 취성과피를 억제하기 위해 나선철근을 삽입하여 간접접합부를 완성한다(Fig. 2(b) 참조). 철골 모멘트골조를 적용하는 경우, 내부매입형 철골 끼움골조와 모두 동일하지만 보강부재인 H형강의 약축이 골조의 저항방향과 평행하여야 하므로 하중전달판이 H형강의 웨브와 접합된다(Fig. 2(c) 참조).

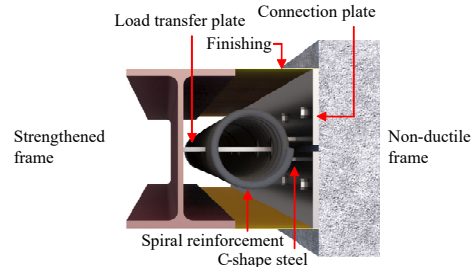
한편, 매뉴얼에서는 직접접합부를 가지는 내진보강공법



(a) Typical window-type WAS retrofitting method



(b) Window-type indirect connection details



(c) Exterior-type indirect connection details

Fig. 2. Connection details of WAS retrofitting method

의 경우, 기존 골조의 전단철근을 회피하면서 후설치 앵커의 구조적 안전성 및 시공성을 확보하기 어렵기 때문에 간접접합부를 적용할 것을 권장하고 있다.

4. 실험체 설계 및 실험계획

4.1 간접접합부 설계 및 재료 물성

Table 1은 간접접합부의 전단내력을 조사하기 위한 WAS 내진보강공법의 접합부 실험체를 정리한 것이다. Figs. 3-5는 실험체의 기초 및 기둥의 크기 및 철근배근 등의 시공상

세, 철골 끼움골조와 모멘트골조 내진보강공법에 대한 간접 접합부의 시공상세를 각각 나타낸 것이다. 본 연구는 WAS 내진보강공법의 간접접합부의 설계전단내력을 지정하기 위한 것이므로 실험체의 기초는 파괴가 발생하지 않도록 충분히 강하게 설계하였다. 기둥의 철근배근은 학교건물 표준 모델(1980년대 ‘다’형)^[17]과 동일한 시공상세로 가정하였다 (Fig. 3 및 Table 1 참조).

실험체는 총 4개로서 제품사양에 기반하여 현장보강상 세와 동일한 규격과 형태로 설계하였다. 아울러 WAS 간접 접합부의 주요 전단저항 구조 요소(접착보강판, C형강, 하 중전달판, 나선철근, 무수축 몰탈)를 일체형 부분모델(sub-assembly model)로 구성하여 실험체를 설계하였다. 실험변 수는 간접접합부의 형태, 하중전달부의 개수, 간접접합부 의 두께 등으로 정하였다.

Table 1. Size and properties for specimens of the indirect connection strengthened by embedded and exterior steel moment frames

Content		Specimen*			
		WAS-W-SPL-T1	WAS-W-DPL-T1	WAS-W-DPL-T2	WAS-E-DPL-T1
Retrofitting type		Window			External
No. of specimens		1 (total 4)			
No. of load transfer plates		1	2	2	2
Thickness of indirect connection (mm)		162	162	262	162
Strengthened member		H-294×200×8×12 (SS275)			
Connection plate	Dimension	PL-110×700×12	PL-110×1100×12		PL-130×1100×12
	Steel	SS275			
C-shape steel		C-50×80×8 (SS275)			
Load transfer plate	Dimension	PL-80×100×8		PL-80×200×8	PL-80×100×8
	Steel	SS275			
(Chemical) anchor		M16 ($f_y = 400$ MPa)			
Concrete	Base	$f_{ck} = 30$ MPa			
	Column	$f_{ck} = 24$ MPa			
Non-shrinkage mortar		$f_{ck} = 50$ MPa			
Rebars		D16/19 (SD400)			
Spiral reinforcement		$\phi 6$ (SD400)			

*WAS: product name, W: retrofit method of window-type steel moment frame, E: retrofit method of exterior-type steel moment frame, SPL: single load transfer plate, DPL: double load transfer plate, T1: indirect connection with the basic thickness, T2: more thicker indirect connection

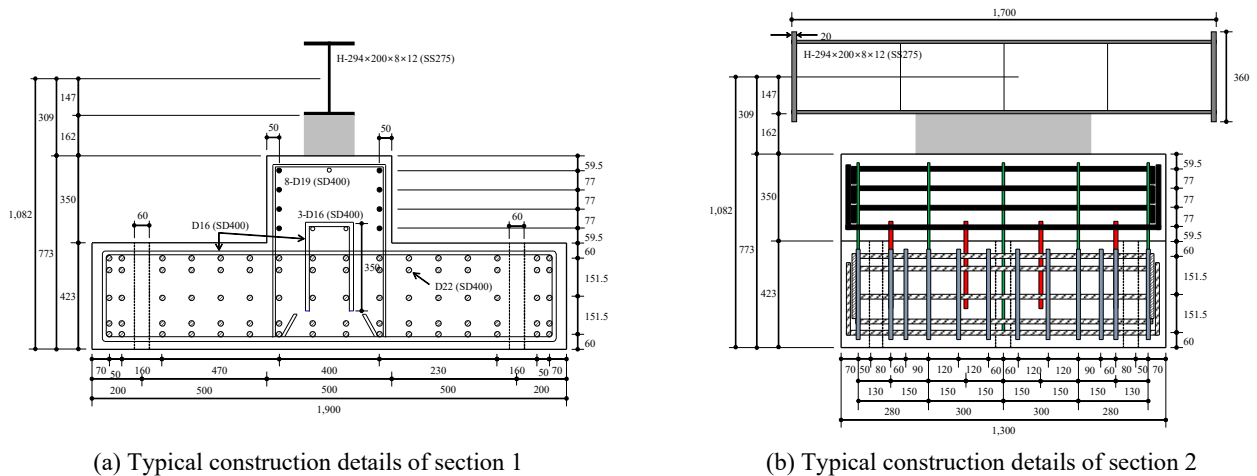


Fig. 3. Typical construction details of base and column part for specimens

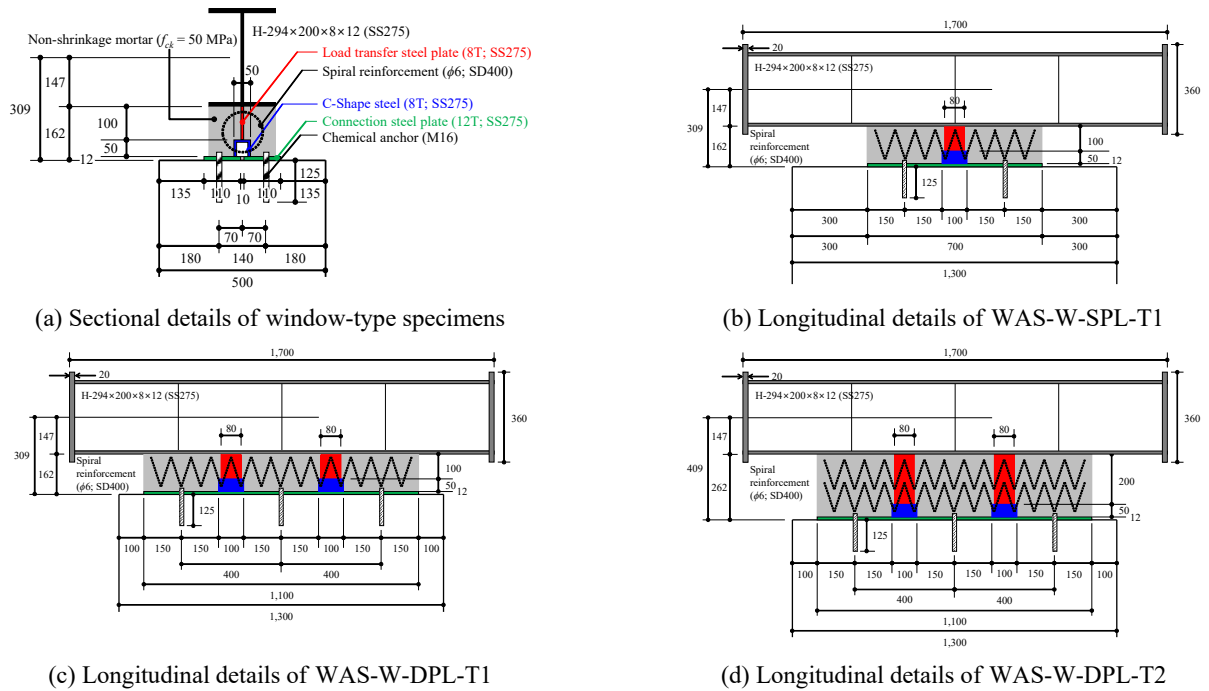


Fig. 4. Construction details of window-type specimens

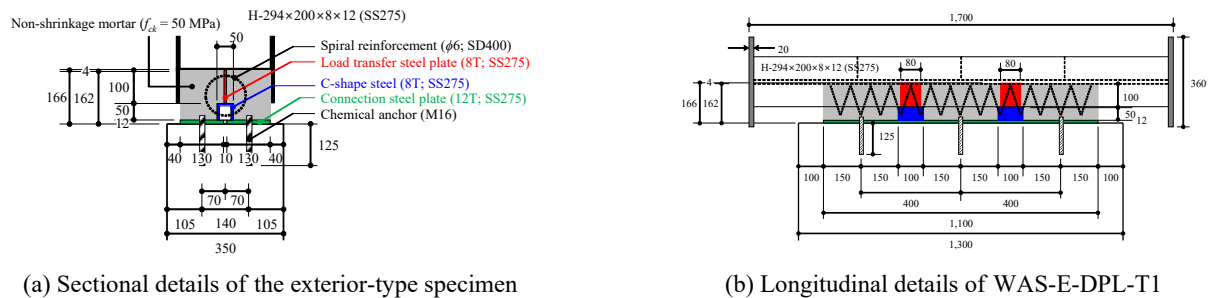


Fig. 5. Construction details of the exterior-type specimen

실험체명은 다음과 같이 정의하였다. WAS는 내진보강 공법 명칭이다. W는 내부매입형(window type) 철골 끼움골조 내진보강공법을, E는 외부부착형(external type) 모멘트골조 내진보강공법을 의미한다. SPL과 DPL은 각각 단일 하중전달판(single plate)과 복수의 하중전달판(double plate)이 설치된 하중전달판 실험체를 지시한다. 아울러 내부매입형 철골 끼움골조 내진보강공법의 간접접합부의 두께에 따른 전단내력의 변동성을 조사하기 위해서 실험체의 간접접합부에 대한 두께 T1과 T2로 나누어 구성하였다. 단, 매뉴얼에서는 건축구조기준하에서 철골 끼움골조를 사용하여 내진보강한 간접접합부의 두께가 160 mm - 250 mm 범위 내에서 설계하도록 권고하고 있다. 이를 준용하여 본 연구에서도 간접접합부의 두께가 이 범위에서 크게 벗어나지 않도록 설계하였다.

실험체의 보강재는 모두 H-294×200×8×12를 사용하였다. 실험체의 간접접합부 중 하중전달부는 후설치 앵커, 접촉보강판, C형강과 하중전달판으로 구성된다. WAS-W-SPL-T1은 단일 하중전달부를, WAS-W-DPL-T1, WAS-W-DPL-T2와 WAS-W-DPL-T1은 두 개의 하중전달부를 가지는 실험체이다. 간접접합부 실험체 T1의 두께는 모두 162 mm, 실험체 T2의 두께는 262 mm이다. 하중전달판은 PL-80×100×8 및 PL-80×200×8을 사용하였다. 단, 간접접합부의 두께는 기존 비보강 철근콘크리트 기둥의 외면과 철골 끼움골조 또는 모멘트골조 H형강 플랜지 및 웨브 배면까지의 거리를 칭한다. 모든 실험체의 C형강은 동일한 크기로서 높이는 50 mm, 폭은 80 mm, 길이는 100 mm이며, 두께는 8 mm이다. 후설치 앵커의 개수는 단일 하중전달부를 가지는 실험체는 4개, 두 개의 하중전달부를 가지는 실험체는 6개로 설계하였다.

접합보강판은 기존 철근콘크리트 골조와의 일체성을 확보하기 위해 철근콘크리트 기둥 또는 보의 외면에 후설치 앵커를 활용하여 결속한다. 내부매입형의 접착보강판은 PL-110×700×12 및 PL-110×1100×12를, 외부부착형의 접착보강판은 PL-130×1100×12를 사용하였다. 접착보강판의 폭은 보강재인 H형강의 플랜지 폭 또는 웨브 춤 이상으로 하며, 길이는 하중전달부가 최대 2개 이내에서 구성되도록 설계하였다. 매뉴얼의 권고에 따라 지름 $\phi 6$ 를 가지는 나선철근을 삽입하여 무수축 몰탈의 취성파괴를 억제하도록 하였다.

H형강, 접착보강판, C형강, 하중전달판은 모두 SS275 강종을 사용하였다. 콘크리트의 설계기준강도(specified concrete strength, f_{ck})는 기초부에 대해서는 30 MPa을, 기둥부에 대해서는 24 MPa을 적용하였다. 무수축 몰탈은 최소기대압축강도 50 MPa을 가지는 제품^[18]을 사용하였다. 후설치 앵커는 M16 케미컬 앵커^[19]를 사용하였다. 이 앵커의 공칭인장항복강도(nominal tensile yield strength, f_y)는 400 MPa이다.

Table 2는 실험체 중 기둥부에 타설된 28일 재령 콘크리트 공시체 강도를 정리한 것이다. 콘크리트 압축강도는 평균 24.6 MPa을 나타내었다.

Table 2. Concrete strength of column for specimens

Cylinder	28-day axial compressive strength of concrete (MPa)
1	24.6
2	25.2
3	24.3
Average	24.6

4.2 가력 및 측정방법

가력프로토콜은 ACI 374.1-05^[20]에 따라 층간변위비 1.0%까지는 0.25%씩, 이후부터는 1.3배씩 층간변위비를 높이며(1.30%, 1.69%, ...) 각 층간변위비 당 3회 반복가력하였다(Fig. 6 참조). 단, 1.0% 층간변위비를 1.0 mm로 간주하고 실험을 수행하였다(Fig. 6 참조).

테스트 셋업은 간접접합부의 순수전단실험을 위해 실험체의 한쪽 단부에 가력기(actuator)를 설치하고, 실험체는 기초부의 각 모서리에 강봉을 사용하여 반력바닥(strong floor)에 고정하였다. 실험체 양단에 힌지를 설치하여 편심에 의한 모멘트 효과가 반영되지 않도록 하였으며, 실험체의 면외변형을 억제하기 위해 가새를 설치하였다(Fig. 7 참조).

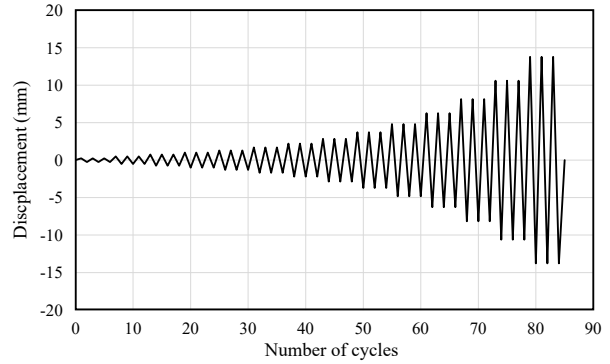


Fig. 6. Loading history per ACI 374.1-05^[20]

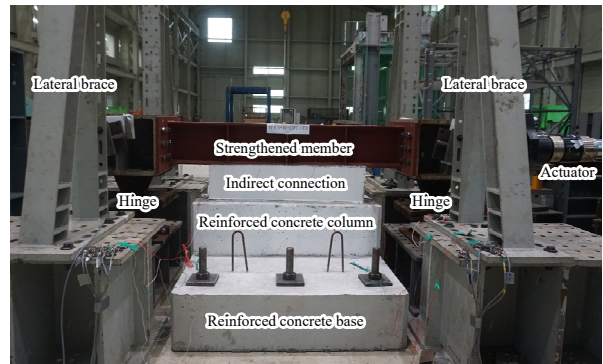


Fig. 7. Test set-up

4.3 후설치 앵커의 설계기준 전단강도

후설치 앵커의 전단파괴는 앵커 강재의 전단파괴, 콘크리트 파괴, 콘크리트의 프라이아웃(pry-out) 파괴 등의 세 가지로 구분하며, 이 값 중에서 최솟값으로 정한다. 다음은 매뉴얼에서 제시하고 있는 각각의 설계전단강도 산정식을 정리한 것이다.

- (1) 후설치 앵커 강재의 설계전단강도(V_{anc}): 슬리브(sleeve)가 전단파괴면까지 연결되지 않으면서 전단을 받는 후설치 앵커 강재의 전단강도는 식 (1)을 이용하여 산정한다.

$$V_{anc} = n(0.6)A_{sc}f_{uta} \quad (1)$$

- (2) 콘크리트의 설계전단강도(V_{conc}): 후설치 앵커 그룹이 설치된 콘크리트의 전단파괴 강도는 식 (2)를 사용하여 산정한다.

$$V_{conc} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \phi_{ec,v} \phi_{ed,v} \phi_{c,v} \phi_{h,v} V_b \quad (2)$$

- (3) 콘크리트의 프라이아웃 설계파괴강도(V_{pry}): 후설치 앵커 그룹이 설치된 콘크리트의 프라이아웃 파괴강도는 식 (3)을 사용하여 산정한다.

$$V_{pry} = k_{pry} N_{pry} \quad (3)$$

5. 실험결과 분석 및 설계전단내력 제안

5.1 파괴양상

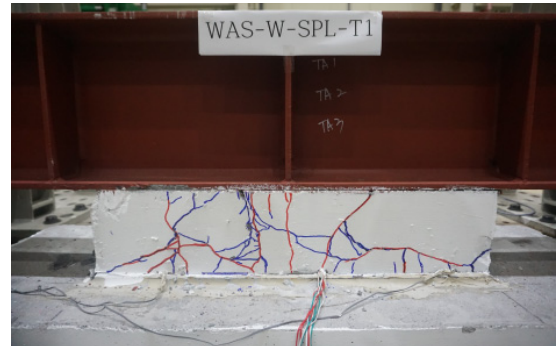
Figs. 8-9는 내부매입형 및 외부부착형 WAS 내진보강공법 간접접합부 실험체의 파괴양상을 각각 나타낸 것이다.

내부매입형(WAS-W형) 실험체는 모두 철근콘크리트 기둥이 면하는 간접접합부의 계면과 하중전달판 주변을 중심으로 균열패턴 및 파괴가 집중 발생하였으며, 하중전달판을 따라 발생한 초기균열이 간접접합부의 계면으로 진전되었다. 특히 단일 하중전달판을 가지는 WAS-W-SPL-T1 실험체의 하중전달부 주변에 집중된 균열패턴 및 파괴양상로부터 전단저항매커니즘에 대한 WAS 내진보강공법 간접접합부의 구성요소별 역할을 명확하게 확인할 수 있다. WAS-W-DPL-T1 실험체와 WAS-W-DPL-T2 실험체는 하중재분배로 복수의 하중전달판을 중심으로 균열이 널리 분포하는 경향을 나타내었다. 내부매입형 실험체의 철근콘크리트 기둥에서는 모두 균열이 확인되지 않았다.

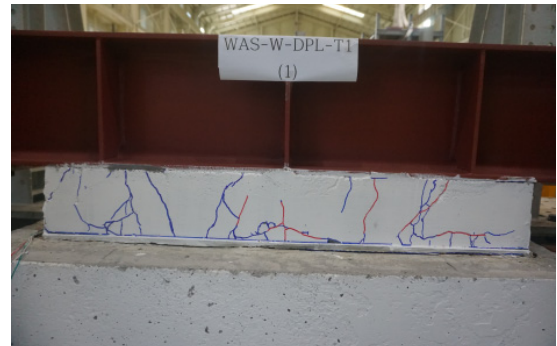
내부매입형에 비해 폭이 넓은 간접접합부를 가지는 외부부착형(WAS-E형) 실험체는 계면 및 하중전달판 주변에 잔균열없이 주요 균열만이 관찰되었다. 후설치 앵커 위치에 간접접합부의 균열 및 철근콘크리트 기둥의 수직균열이 발생하였다. 이것은 WAS 내진보강공법의 외부부착형 간접접합부의 전단내력(shear-resistant capacity)이 철근콘크리트 기둥과의 일체성을 확보하기 위해 설치된 후설치 앵커의 설계전단강도 이상이 분담되어 균열이 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 간접접합부 실험체의 균열패턴을 기반으로 하여 간접접합부를 주요 전단저항 역할을 담당하는 영향부(affected zone)과 영향부를 보조하는 비영향부(non-affected zone)로 구분하여 나타낸 것이다.

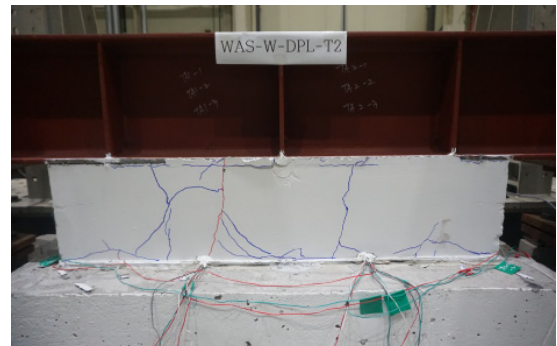
WAS-W-DPL-T1 실험체와 비교하여 약 1.62배의 내부매입형 간접접합부의 두께를 가지는 WAS-W-DPL-T2 실험체는 비영향부가 상대적으로 크다. Figs. 8-9의 균열패턴은 하



(a) WAS-W-SPL-T1



(b) WAS-W-DPL-T1



(c) WAS-W-DPL-T2

Fig. 8. Failure and crack patterns of specimens with the window-type indirect connection



Fig. 9. Failure and crack patterns of specimens with the exterior-type indirect connection (WAS-E-DPL-T1)

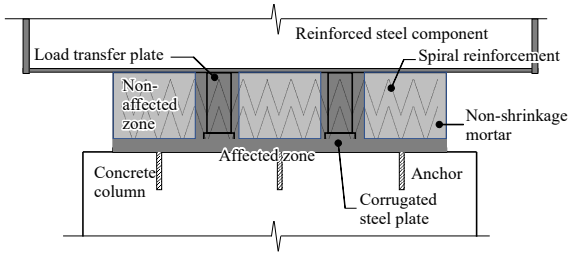


Fig. 10. Division of an affected and non-affected zones of the indirect connection against the shear force

중전달부 주변에서 집중적으로 발생하고 있으므로, WAS 내진보강공법의 간접접합부의 전단내력은 하중전달부의 기여도가 가장 큼을 알 수 있다.

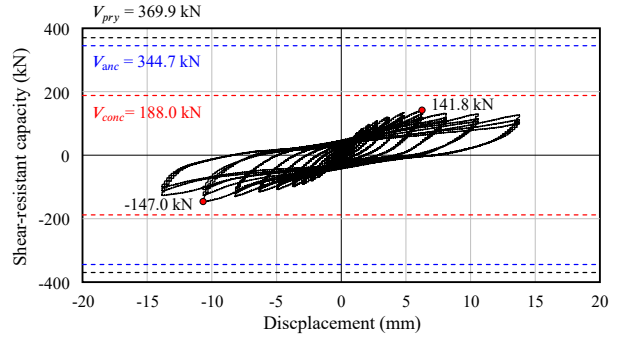
즉 간접접합부의 전단내력에 대한 무수축 몰탈의 기여도는 접착보강판 및 하중전달판에 비해 현저히 낮다고 볼 수 있다. 나선철근에 의해 균열이 억제된 무수축 몰탈은 하중전달판의 좌굴(buckling)을 방지하는 역할을 담당함으로써 하중전달판의 전단내력을 최대한 발휘할 수 있도록 지원하며, 무수축 몰탈의 광범위한 균열이 발생하지 않은 것은 나선철근이 주어진 역할을 충실히 수행하였다고 볼 수 있다. 하지만 이러한 나선철근이 무수축 몰탈의 균열 발생을 억제함으로써 비영향부에서의 무수축 몰탈을 블록화하고, 하중전달부 주변의 균열부를 경계로 간접접합부의 전단저항 구성요소에서 배제되고 있음도 확인할 수 있다. 이러한 거동으로 인해 두꺼운 간접접합부를 가지는 WAS-W-DPL-T2 실험체의 경우, 비영향부의 무수축 몰탈의 전단내력에 대한 기여도가 현저히 낮기 때문에 하중전달판의 소성화에 따른 에너지 소산거동을 발현할 것으로 예상된다.

5.2 전단내력-변위 관계 및 설계전단내력 제안

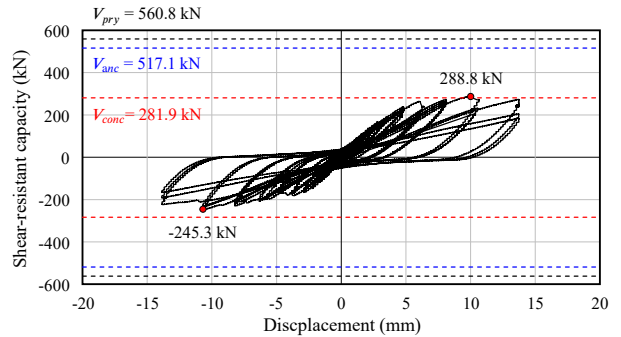
Figs. 11-12는 내부매입형 및 외부부착형 간접접합부 실험체의 전단내력-변위관계 곡선을 각각 나타낸 것이다.

매뉴얼에 근거한 4개의 후설치 앵커를 사용하는 WAS-W-SPL-T1 실험체의 전단내력을 지지하는 후설치 앵커 및 콘크리트의 설계전단강도는 344.7 kN 및 188.0 kN이며, 콘크리트의 프라이아웃 설계파괴강도는 369.9 kN이다. 6개의 후설치 앵커를 설치한 나머지 3개의 실험체(WAS-W-DPL-T1, WAS-W-DPL-T2, WAS-E-DPL-T1)의 후설치 앵커 및 콘크리트의 전단파괴강도는 517.1 kN 및 281.9 kN이며, 콘크리트의 프라이아웃 파괴강도는 560.8 kN이다.

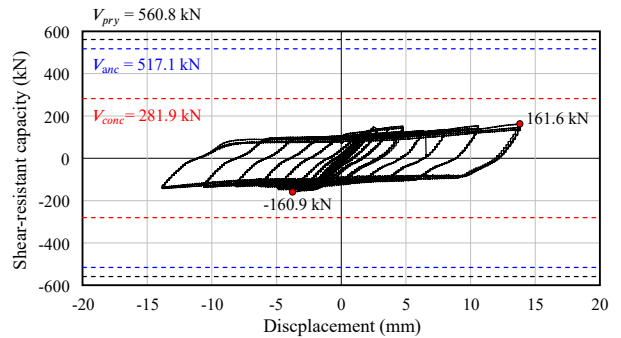
WAS-W-SPL-T1 실험체의 최대전단내력은 147.0 kN으



(a) WAS-W-SPL-T1



(b) WAS-W-DPL-T1



(c) WAS-W-DPL-T2

Fig. 11. Shear-resistant capacity and displacement relationship of specimens with the window-type indirect connection

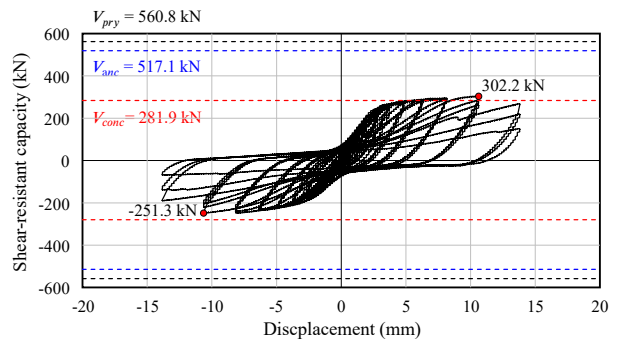


Fig. 12. Shear-resistant capacity and displacement relationship of specimens with the exterior-type indirect connection (WAS-E-DPL-T1)

로서 전단력을 지지하는 앵커 및 콘크리트의 설계내력보다 작다(Fig. 11(a) 및 Table 3 참조). 따라서 이 간접접합부의 전단내력은 실험값을 사용하여 설계하여야 한다.

WAS-W-DPL-T1 실험체의 최대전단내력은 288.8 kN 으로서 후설치 앵커의 설계전단강도 및 콘크리트 프라이아웃 설계파괴강도보다 작지만 콘크리트 설계전단강도 약 6.9 kN이 크다(Fig. 11(b) 및 Table 3 참조). 따라서 철근콘크리트 기둥의 전단균열이 예상되지만, 실험값이 설계값에 비해 단지 약 2.4%의 차이를 보이기 때문에 실험체의 파괴는 발생하지 않은 것으로 판단된다. 하지만 콘크리트의 설계전단강도가 실험값에 비해 작으므로 이 실험체의 전단내력은 콘크리트 설계전단강도에 의해 결정된다.

T1 실험체에 비해 약 1.62배의 간접접합부 두께를 가지는 WAS-W-DPL-T2 실험체의 최대전단내력은 161.6 kN 으로서 전단력을 지지하는 후설치 앵커 및 콘크리트의 설계전단강도 보다 작다(Fig. 11(c) 및 Table 3 참조). 따라서 이 실험체의 전단내력은 실험값에 의해 결정된다. 단, 앞 절에서 논의한 바와 같이, 간접접합부가 두꺼워질수록 전단력에 대한 정착보강판 및 하중전달판의 역할이 점점 커지고 그 외부위는 기여도가 점차 작아진다. T1 실험체의 거동과는 달리 전단강도는 작아지나 하중전달판의 소성화 거동에 의해 에너지 소산면적은 확대된다.

외부부착형인 WAS-E-DPL-T1 실험체의 최대전단내력은 302.2 kN 으로서 후설치 앵커의 설계전단강도 및 콘크리트 프라이아웃 설계파괴강도 보다는 작지만 콘크리트 설계전단강도 보다 약 20.3 kN이 크다(Fig. 12 및 Table 3 참조). 앞 절의 실험체 균열패턴 및 파괴양상에서 보여준 것처럼

철근콘크리트 기둥에서 전단균열이 발생함을 확인할 수 있었다. 실험 및 설계값의 차가 약 7.2%로서 확연하게 차이가 나기 때문에 WAS-W-DPL-T1 실험체와는 달리 균열이 뚜렷하게 발생한 것으로 판단된다. 이 실험체 역시 콘크리트의 설계전단강도가 실험값에 비해 작으므로 이 실험체의 전단내력은 콘크리트의 설계전단강도를 사용하여 간접접합부를 설계하여야 한다.

Table 3은 실험결과 및 매뉴얼에 근거한 설계전단강도 (후설치 앵커의 전단강도, 콘크리트의 전단강도, 프라이아웃 파괴강도)를 정리하여 실험체별 간접접합부의 안전율 (safety factor)을 살펴보고, WAS 내진보강공법 간접접합부의 합리적인 설계전단강도를 설정하기 위한 실험체간의 강도비를 정리한 것이다.

WAS-W-SPL-T1 실험체의 안전율은 앵커의 설계전단강도 및 콘크리트의 프라이아웃 설계파괴강도에 대해서 각각 2.35 및 2.52이며, 콘크리트 설계전단강도에 대해서는 1.28을 나타내었다. 내진보강설계시에 전단강도는 탄성한계를 외력에 대한 최대내력으로 간주하는 하중지배요소(force-controlled component)이므로 실험값을 간접접합부의 설계전단강도로 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

WAS-W-DPL-T2 실험체의 안전율은 앵커 및 콘크리트의 설계전단강도에 대해서 각각 3.20 및 1.74를, 콘크리트의 프라이아웃 설계파괴강도에 대해서는 3.47을 나타내었다. 실험체 중에서는 가장 높은 안전율을 나타내었는데 이것은 간접접합부의 두께와 간접접합부의 강도가 반비례하므로 이러한 결과가 초래된 것으로 판단된다.

간접접합부의 접합방식은 상이하지만 거의 동일한 상세

Table 3. Experimental results and analysis

Specimen	Maximum shear-resistant capacity V_u^{\max} (kN)		Displacement corresponding V_u^{\max} (mm)		Design shear strength due to post-installed anchor and concrete (kN)			Safety factor			$\frac{V_u^{\max}}{V_{u,spl}^{\max}}$	$\frac{V_u^{\max}}{V_{u,T1}^{\max}}$ $\left(\frac{V_{u,T1}^{\max}}{V_u^{\max}}\right)$
	Pos. (+)	Neg. (-)	Pos. (+)	Neg. (-)	Anchor (V_{anc})	Pry-out (V_{pry})	Concrete (V_{conc})	$\frac{V_{anc}}{V_u^{\max}}$	$\frac{V_{pry}}{V_u^{\max}}$	$\frac{V_{conc}}{V_u^{\max}}$		
WAS-W-SPL-T1	141.8	147.0	6.26	10.50	344.7	369.9	188.0	2.35	2.52	1.28	1.00	-
WAS-W-DPL-T1	288.8	245.3	9.85	10.50	517.1	560.8	281.9	1.79	1.94	0.98	1.96	1.00
WAS-W-DPL-T2	161.6	160.9	13.80	3.58				3.20	3.47	1.74	-	0.56 (1.79)
WAS-E-DPL-T1	302.2	251.3	10.4	8.12				1.71	1.86	0.93	-	-

를 가지는 WAS-W-DPL-T1 실험체와 WAS-E-DPL-T1 실험체는 거의 동일한 안전율을 나타내고 있다. 후설치 앵커의 설계전단강도 및 콘크리트의 프라이어아웃 설계파괴강도에 대한 안전율은 각각 약 1.7 및 1.9를 나타내었다. 콘크리트의 전단강도에 대한 안전율은 각각 0.98 및 0.93으로서 모두 안전율 1.0을 하회하고 있다.

위의 결과를 종합하여 볼 때, 본 연구에서 제시한 간접접합부의 전단강도는 실험결과와 매뉴얼에 의한 설계강도를 모두 검토하여 가장 작은 값을 적용하는 것이 타당하다.

한편, 하중전달부의 개수에 따른 실험체의 전단강도비 ($V_u^{max}/V_{u,sp}^{max}$)는 비례적으로 1.96배 증가하므로 하중전달부의 개수에 비례하여 간접접합부의 전단강도를 고려하여도 무방할 것으로 판단된다. 아울러 간접접합부의 두께에 따른 전단강도비 ($V_u^{max}/V_{u,T1}^{max}$)는 0.56배를 나타내었다. 이 결과를 간접접합부의 두께와 전단강도 측면에서 고려하면, 표본수가 부족하지만 두께는 약 1.6배가 증가할 때 전단강도는 약 1.79배 감소하고 간접접합부 두께의 변동성이 크지 않으므로 간접접합부의 두께에 비례한 간접접합부의 강도를 사용하면 될 것으로 판단된다.

간접접합부의 두께가 약 160 mm인 경우, 설계전단강도는 281.9 kN이고, 2개의 하중전달부를 가지는 내부매입형 및 외부부착형 간접접합부의 실험값은 각각 288.8 kN 및 302.2 kN이다. 따라서 이 값 중에서 최솟값인 설계전단강도가 간접접합부의 전단내력으로 지정된다. 이 값을 내부매입형 및 외부부착형 간접접합부의 개소당 전단내력으로 환산하여 하중전달부의 설계전단강도는 141 kN이 된다. 이 값을 WAS 내진보강공법 간접접합부의 설계전단내력으로 지정한다면 단일 하중전달부를 가지는 WAS-W-SPL-T1 실험체의 실험결과(= 147 kN)보다 보수적이므로 수치해석 모델링의 범용성 및 간소화를 동시에 확보할 수 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서 수행한 간접접합부를 가지는 철골 끼움골조 및 철골 모멘트골조 WAS 내진보강공법에 대한 기준에 부합하는 수치해석모델 작성을 위한 간접접합부의 설계전단강도 실험결과는 다음과 같다.

- (1) 실험에 의한 실험체의 균열패턴 및 파괴양상을 통해 WAS 내진보강공법 간접접합부는 내부매입형 및 외

부부착형 모두 하중전달부(접착보강판 및 ㄱ형강, 하중전달판)가 전단력에 대한 주요 저항요소이고, 무수축 몰탈 및 나선철근은 이 두 요소에 대한 지원을 수행함을 확인하였다.

- (2) 접합형태과 무관하게 WAS 내진보강공법 간접접합부의 수치해석모델링 작성을 위한 설계전단강도는 하중전달부 개소당 141 kN을 적용할 것을 제시하였다. 단, 기존 골조의 콘크리트 강도에 따라 콘크리트 강도와 관련한 후설치 앵커의 설계전단강도가 달라 지므로 이에 대한 검토가 필요하다.
- (3) 아울러 실험결과에 근거하여 WAS 내진보강공법 간접접합부의 전단내력은 하중전달부의 개수에 비례하고, 두께에는 반비례하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌(References)

- [1] Korea Meteorological Administration (2019) *National Earthquake Comprehensive Information System*, <http://necis.kma.go.kr> (in Korean).
- [2] Neria, Y., Nandi, A., and Galea, S. (2008) Post-Traumatic Stress Disorder Following Disasters: A Systematic Review, *Psychological Medicine*, Cambridge University Press, Vol.38, No.4, pp.467-480.
- [3] Ministry of the Interior and Safety (2018) *2017 Pohang Earthquake White Paper*, MOIS, Korea (in Korean).
- [4] Ministry of the Interior and Safety (2018) *Establishment of Master Plan for Korean Seismic Design and Retrofit*, MOIS, Korea (in Korean).
- [5] Kim, S., and Lee, K. (2020) Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Strengthened by Embedded Steel Frame, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.24, No.1, pp.29-37 (in Korean).
- [6] Kim, S. (2020) Seismic Performance Evaluation of Non-Seismic Reinforced Concrete Buildings Strengthened by Perimeter Steel Moment Frame, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.24, No.5, pp.233-241 (in Korean).
- [7] Lee, B.-K., Hwang, D.-S., Choi, Y.-C., Kim, Y.-S., and Lee, K.-S. (2019) Seismic Capacity Evaluation of Full-Size Two-Story R/C Frame Strengthened with HSWF External Connection Method by Pseudo-Dynamic Test,

Journal of the Korea Concrete Institute, KCI, Vol.31, No.1, pp.89-97 (in Korean).

[8] Jung, H.-C., Jung, J.-S., and Lee, K.-S. (2019) Seismic Performance Evaluation of Internal Steel Frame Connection Method for Seismic Strengthening by Cycling Load Test and Nonlinear Analysis, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.31, No.1, pp.79-88 (in Korean).

[9] Shin, H.-M., Lee, H.D., and Shin, K.J. (2018) Seismic Performance Evaluation of Building with Piloti Using Steel Slit Damper, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.5, pp.265-276 (in Korean).

[10] Lim, W.-Y. (2018) Seismic Performance of Shear Dominant Hybrid Steel Link Beam with Circular Web Opening, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.1, pp.37-48 (in Korean).

[11] Lee, D.Y., Cho, B.H., Hong, P.G., and Ha, T.H. (2019) Seismic Performance Evaluation of Beam-Column Connection of Unitized Floor System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.2, pp.85-96 (in Korean).

[12] Building Seismic Safety Council (1992) *NEHRP Handbook of Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Federal Emergency Management Agency, USA.

[13] Rutherford & Chekene Consulting Engineers (2006) *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Federal Emergency Management Agency, USA.

[14] Japan Building Disaster Prevention Association (2017) *Japanese Seismic Design Code and Guidelines of Seismic Retrofit and Commentary of Existing Reinforced Concrete Buildings*, JBDPA, Japan (in Japanese).

[15] Ministry of Education (2020) *Seismic Design Code of Korean School Facilities* (MOE Notice No. 2020-223), MOE, Korea (in Korean).

[16] Ministry of Education (2019) *Manual of Seismic Performance Evaluation and Retrofit of Korean School Facilities*, MOE, Korea (in Korean).

[17] Lee, K.S. et al. (2011) *Development of Guideline for Seismic Evaluation and Rehabilitation of Existing School Buildings in Korea* (CR2011-41), KEDI, Korea (in Korean).

[18] Union Corp. (n.d.) *Union Official Website*, <http://www.unioncement.com> (in Korean).

[19] HILTI Corporation (2012) *Operating Instruction for Hilti HIT-CT 1 with HIT-V*, HILTI Corporation, USA.

[20] American Concrete Institute Committee 374 (2006) *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary* (ACI 374.1-05), USA.

기 호(Notation)

A_{se}	$\pi/4(d_a - 0.9743/n_t)^2$ (mm ²)
A_{vc}	단일 앵커 또는 앵커 그룹에 대해 콘크리트 가장자리 측면에 생기는 파괴면의 투영면적(mm ²)
A_{vco}	단일 앵커의 콘크리트 파괴면을 부재 측면에 투영한 면적(= $4.5c_{a1}$, mm ²)
c_{a1}	앵커에서 콘크리트 단부까지의 거리(mm)
d_a	앵커의 외경(mm)
$e'v$	앵커 중심과 전단력 작용지점 사이의 거리(mm)
f_y	앵커의 인장항복강도(MPa)
f_{ua}	$1.9f_y$, (MPa, ≤ 860 MPa)
h_{ef}	앵커의 묻힘 깊이(mm)
k_{pry}	2.0 ($h_{ef} \geq 65$ mm)
l_e	전단력에 의해 앵커가 지압을 받는 길이(mm)
N_{pry}	인장을 받는 앵커의 콘크리트 파괴강도(kN)
n	전단력을 지지하는 앵커의 개수
n_t	mm당 나사산의 수
V_b	균열콘크리트에 설치된 단일 앵커의 기본전단강도($\leq 0.6(l_e/d_a)^{0.2} \sqrt{d_a} \sqrt{f_{ck}} (c_{a1})^{1.5}$, kN)
$V_{u,spl}^{max}$	단일 하중전달판을 가지는 내부매입형 간접접합부의 최대 전단내력(kN)
$V_{u,T1}^{max}$	T1두께를 가지며 복수의 하중전달판을 가지는 내부매입형 간접접합부의 최대 전단내력(kN)
δ	실험체의 변위(mm)
$\phi_{ec,v}$	편심하중에 관한 수정계수 (= $1/1[1 + 2e'v/(3h_{ef})] \leq 1.0$)
$\phi_{ed,v}$	가장자리 영향에 관한 수정계수 (= $1.0, c_{a1} \geq 1.5h_{ef}; = 0.7 + 0.3c_{a1}/(1.5h_{ef}), c_{a1} < 1.5h_{ef}$)
$\phi_{e,v}$	균열의 영향에 관한 수정계수(= 1.4, 비균열단면)
$\phi_{h,v}$	부재 두께에 관한 수정계수 (= $\sqrt{1.5c_{a1}/h_a}, h_a < 1.5c_{a1}$)

요 약 : 간접접합부를 가지는 내부매입형 철골 끼움골조 또는 외부부착형 철골 모멘트골조 내진보강공법을 적용한 시설물의 내진 성능평가를 위해서는 간접접합부의 전단에 대한 수치해석모델이 요구되지만 건축구조기준에서는 특정 내진보강공법의 간접접합부에 대한 설계방안을 제시하지 못하고 있다. 본 연구에서는 WAS 내진보강공법 간접접합부의 전단내력을 조사하기 위해 실험을 수행하였다. WAS 내진보강공법 간접접합부의 주요한 전단저항 구조 요소를 파악하였으며, 접합형태와 상관없이 간접접합부의 상세에 따른 전단내력을 제시하였다. 아울러 간접접합부의 하중전달요소의 개수 및 두께에 따른 전단내력 산정방안을 제시하였다.

핵심용어 : 내진보강, 철골 모멘트골조, 접합부, 실험, 앵커, 전단내력
