

콘크리트 채움 U형 합성보와 선조립기둥의 내진접합부 성능실험

Seismic Performance Test of Concrete-filled U-shaped Steel Beam-to-Prefabricated Column Connections

김 형 섭* 이 창 남**
Kim, Hyoung-Seop Lee, Change-Nam
이 승 환*** 김 법 렬****
Lee, Seung-Hwan Kim, Bub-Ryur

Abstract

In this paper, the connection details of the prefabricated RC/SRC columns and a concrete-encased U-shaped steel beam is presented, and their seismic resistance performance is evaluated through a full-scale test. One of the life-scale column specimens for the test is a prefabricated RC column built with reinforcing bars, and the other one is a prefabricated SRC column built with L-shaped angle steels and reinforcing bars. Both of the columns are fully fabricated at factory by precise shop welding, so they don't need on-site bar arrangement and temporary supports. Although there were many other seismic resistance performance evaluation tests with the forenamed columns and beams, but most of the previous tests were mainly arranged to demonstrate the performance of the connections as the special moment frame (SMF). However, in majority of real-world cases special moment frame is generally not common due to high cost and low workability. This paper presents more practical connection details of beam-to-column connections which accord with the intermediate moment frame (IMF) conditions as defined in the Korea Building Code 2009 (KBC2009) and, also, presents the result of the test which proves the aforementioned claim by using the life-scale specimens and finite element analysis.

키워드 : 내진성능실험, U형 합성보, 선조립 RC기둥, 선조립 SRC 기둥, 중간모멘트골조

Keywords : Seismic Performance Test, U-shaped Composite Beam, Prefabricated RC Column, Prefabricated SRC Column, Intermediate Moment Frame(IMF)

1. 서 론

철강재 가격의 상승으로 인해 순수 철골건물이 점점 줄어들고 철근 콘크리트구조 설계가 증가하고 있으며, 한편으로는 재료의 효율적, 경제적 사용에 대한 수요에 따라 이중재료를 이용한 합성구조의 연구가 활발히 진행되고 있다.

지금까지 가장 많이 사용되어 온 합성구조는 H형강 강재와 상부슬래브를 이용한 합성보 시스템이었다. 상기 H형강 합성보와 철골기둥의 내진접합에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었다.¹⁾⁻³⁾ 연구내용은 주로 H형강 합성보와 철골기둥 사이의 힘 전달에 관한 내용이다.

최근에는 합성구조의 경제성에 초점을 맞춘 다양한 합성구조 시스템이 개발되고 있다. 그 중 H형강 합성구조를 제외하고 현재 국내건설시장에서 가장 많은 사용실적이

있는 합성보는 U형 강재 내부에 콘크리트를 채우는 TSC 합성보이다. 그림 1은 TSC 합성보의 단면으로서 냉간성형으로 제작한 두 개의 J형 단면을 자동용접기로 용접부착하여 제작한다. 정모멘트에 대해서, 압축은 콘크리트 슬래브가 받고 인장은 하부 TSC 강재가 받으며, 단부의 부모멘트에 대해서는 상부 주근이 인장을 받고 하부 TSC 강재와 내부콘크리트가 압축을 받는다. 여기서 TSC 강재 내부의 콘크리트는 TSC 강재의 국부좌굴과 횡좌굴에 저항하므로 TSC 합성보는 H형강 합성보와 달리 내진시스

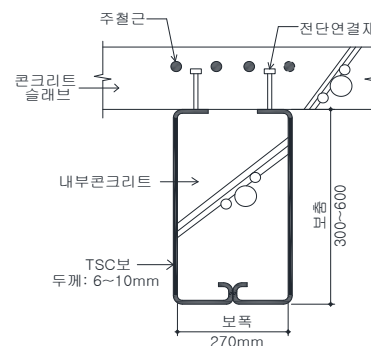


그림 1. TSC 합성보 단면

* (주)센구조연구소 차장

(교신저자, E-mail : hskim@senkuzo.com)

** (주)센구조연구소 대표이사

*** (주)센코어테크 대표이사

**** (주)센구조연구소 사원



그림 2. 철근선조립(PRC) 현장 적용 모습

템에서 황좌굴 보강이 불필요하다. 또한 내부콘크리트의 축원효과로 인해 H형강에 비해 얇은 두께로 한국건설기술 연구원으로부터 내화인증을 획득⁴⁾(3시간기준 21mm, 일반 H형강은 약 40mm 임) 하였으며, 진동 및 차음성능도 향상되는 장점이 있다. 철근 콘크리트와 비교하면 거푸집이 생략되어 공기단축이 가능하며 단면성능 증대로 충고절감 이 가능하다.

TSC 합성보는 주로 철골 또는 H형강이 매립된 철골철근 콘크리트(SRC) 기둥에 접합되어 왔고, 이에 관련하여 내진접합부 성능시험도 여러 번 수행되었다.⁵⁾⁻⁷⁾ 이 실험에서 TSC 합성보에 사용되는 얇은 강판은 좌굴을 억제하여 TSC 합성보가 하중재하능력의 급격한 감소 없이 AISC에서 명시하는 특수모멘트 골조 이상의 성능을 가지고 있음 이 입증되었다.

최근 경제적인 측면에서 기둥이 점점 RC구조로 설계되고 있으나, RC기둥은 공사기간이 철골 혹은 SRC 구조 대비 긴 단점이 있어서 RC 기둥에 TSC 합성보를 적용하면 TSC 합성보의 장점 중 하나인 공기단축효과가 상쇄될 뿐 아니라 TSC 합성보와 RC 기둥과의 접합도 쉽지 않다.

본 연구에서 TSC 합성보와 접합되는 기둥은 두 종류로써 선조립 철근 콘크리트(이하 PRC: Prefabricated Reinforced Concrete) 기둥과 앵글을 이용한 선조립 철골 철근 콘크리트(이하 PSRC: Prefabricated Steel Reinforced Concrete) 기둥이다.

PRC 기둥 및 PSRC 기둥은 주근 또는 앵글을 띠철근과 용접접합하여 자립성이 확보되고 현장에서의 철근배근 작업을 완전히 없앴으로써 공기 단축과 깨끗한 현장관리가 가능할 뿐 아니라 현장에서의 사고위험성을 줄일 수 있다. 또한 현장에서는 인력배근이 불가능한 대구경 고강도 용접용 철근(D41, SD500w)을 주로 사용하고, 이음에 기계적이음 혹은 용접이음을 사용함으로써 강재량 절감도 가능하다. PRC 기둥은 RC의 상세와 일반적으로 동일하지만 주근과 띠철근을 용접접합함으로써 자립성을 확보해야 하기 때문에 대구경 용접용 철근을 사용한다. 용접용 철근을 이용한 PRC 기둥의 내진접합부 성능시험도 이미 수행되었다⁸⁾. 이 시험에서는 기둥뿐 아니라 RC보도 선조립 시

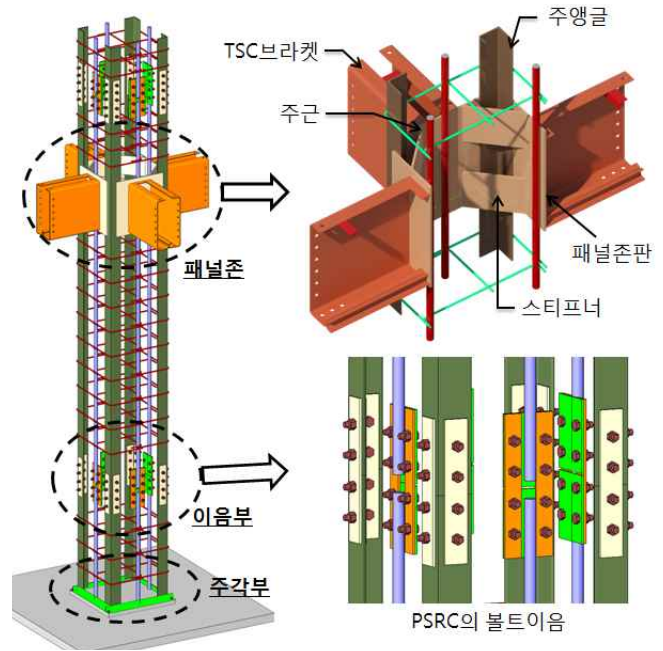


그림 3. PSRC 기둥 형상

스템이 적용되었다. 그림 2는 PRC 기둥을 적용한 현장의 모습인데 용접된 철근망이 자립성을 확보하고 있음을 확인 할 수 있다.

반면 PSRC 기둥은 그림 3과 같이 네 모서리에 앵글을 배치하고 그들 사이에 철근을 배치한다. PSRC 기둥은 기초와 기둥을 연결하는 주각부, 기본 2~3개층으로 이루어지는 절마다의 이음부, 그리고 보와의 접합부인 패널존으로 이루어진다. PSRC의 이음부는 볼트이음이 가능하고 경우에 따라 용접이음도 할 수 있다.

TSC 합성보와 PRC 기둥과의 접합에 대해서는 이미 특수모멘트 골조를 목표로 시험을 수행되었지만⁹⁾ 내진설계시 특수모멘트골조는 자주 사용하지 않을 뿐 아니라 경제성이 떨어지게 된다.

본 연구에서는 위의 단점을 해소시키기 위해 PRC 기둥 및 PSRC 기둥과 TSC 합성보와의 내진접합부를 개발하였다. PRC와 PSRC 및 TSC 합성보는 모두 실험체 크기의 실험체를 제작하고 KBC 2009¹⁰⁾ 기준에 따라 내진접합성능 시험을 수행하였고 이를 해석적으로 검증하였다.

2. 실험계획

2.1 실험체 형상

본 실험을 위해 실험체 두 개를 제작하였으며 그림 4와 그림 5는 각각의 실험체에 대한 입면도, 평면도 및 상세도이다. 보는 TSC 합성보이고, 실험체-I의 기둥은 PRC 기둥이다. 실험체-II는 PSRC 기둥이고 TSC 합성보는 두 실험체 모두 전단연결재를 사용한 완전합성보로 설계하였다. 위 내용의 사양 및 크기는 표 1에 정리하였으며, 실험체에 설치된 패널존 강판과 스티프너의 사양 및 크기 그리고 TSC 합성보의 주근도 포함하였다. 또한 재료의 소재시험 결과값도 나타내었다.

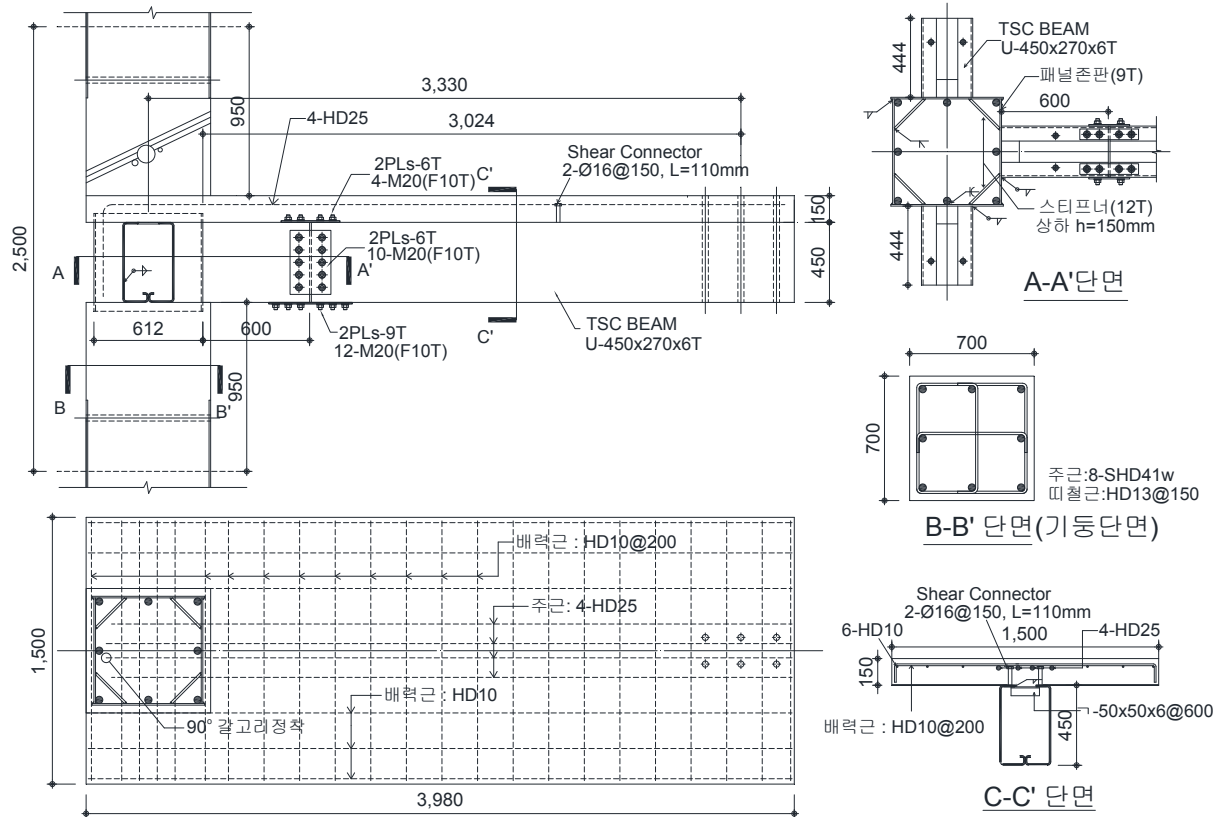


그림 4. 실험체-I 상세도면

그림 6은 기둥과 보가 만나는 부분의 패널존 형상을 3D로 그린 것인데, 그림 6(a)는 실험체-I에서 PRC 기둥과 TSC합성보의 접합부이고, 그림 6(b)는 실험체-II에서 PSRC와 TSC 접합부 형상이다. 여기서 두 접합부 모두 외부로는 패널존 강판이 둘러싸고 있고, 내부에는 TSC의

힘을 전달하기 위해 대각선 방향으로 높이 150mm인 스티프너가 상하에 설치되어 있다. 즉, 기둥-보 접합부의 형상은 PRC 기둥과 PSRC 기둥이 동일하다.

TSC 합성보의 단부에 정모멘트가 작용할 때는 패널존 강판 내부의 스티프너가 TSC 철골의 인장력을 지지하고 압축력은 연속된 슬래브콘크리트가 지지한다. 반대로 부모멘트가 작용할 때에는 슬래브에 배근된 철근에 인장력이 작용하고 TSC 철골과 TSC 내부 콘크리트가 받는 압축력을 패널존판이 기둥에 지압으로 전달하도록 설계하였다.

표 1. 실험체형상

단위:mm

		실험체-I	실험체-II
TSC 합성보	크기	W-450×270×6 (높이×폭×두께)	W-550×270×8 (높이×폭×두께)
	주철근	4-HD25	4-HD25
선조립 기둥	단면	700 × 700(PRC)	700 × 700(PSRC)
	주철근	8-SHD41w(SD500)	4-SHD29w(SD500)
		형강	-
패널존판 (SM490)		550 × 9 (높이 × 두께)	650 × 12 (높이 × 두께)
스티프너 (SM490)		150 × 12 (높이 × 두께)	150 × 15 (높이 × 두께)
전단연결재 (SS400)		2-Ø16@150	2-Ø19@150
RC슬래브		1500 × 150 (폭 × 두께), $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$	
재료 강도 (소재시험결과)	TSC	445.2 MPa	415.6 MPa
	철근	515.6 MPa	
	콘크리트	24.8 MPa	25.7 MPa
비 고		TSC의 볼트이음	

2.2 실험체 설계

KBC2009¹⁰⁾ 기준에 따르면 연직하중(고정하중과 적재하중)과 횡하중(풍하중과 지진하중)의 하중조합은 다음의 4가지다.

- 1.2D + 1.0L + 1.3W (1)
- 1.2D + 1.0L + 1.0E (2)
- 0.9D + 1.3W (3)
- 0.9D + 1.0E (4)

여기서, D는 고정하중, L은 적재하중, W는 풍하중 그리고 E는 지진하중이다.

위 식 (1)~(4)에서 알 수 있듯이 지진하중이나 풍하중과 같은 횡하중이 포함된 하중조합에 의한 부재설계 시에는 항상 연직하중(고정하중과 적재하중)이 포함된다. 그림 7은 구조프레임에 연직하중과 횡하중이 작용할 경우 하중

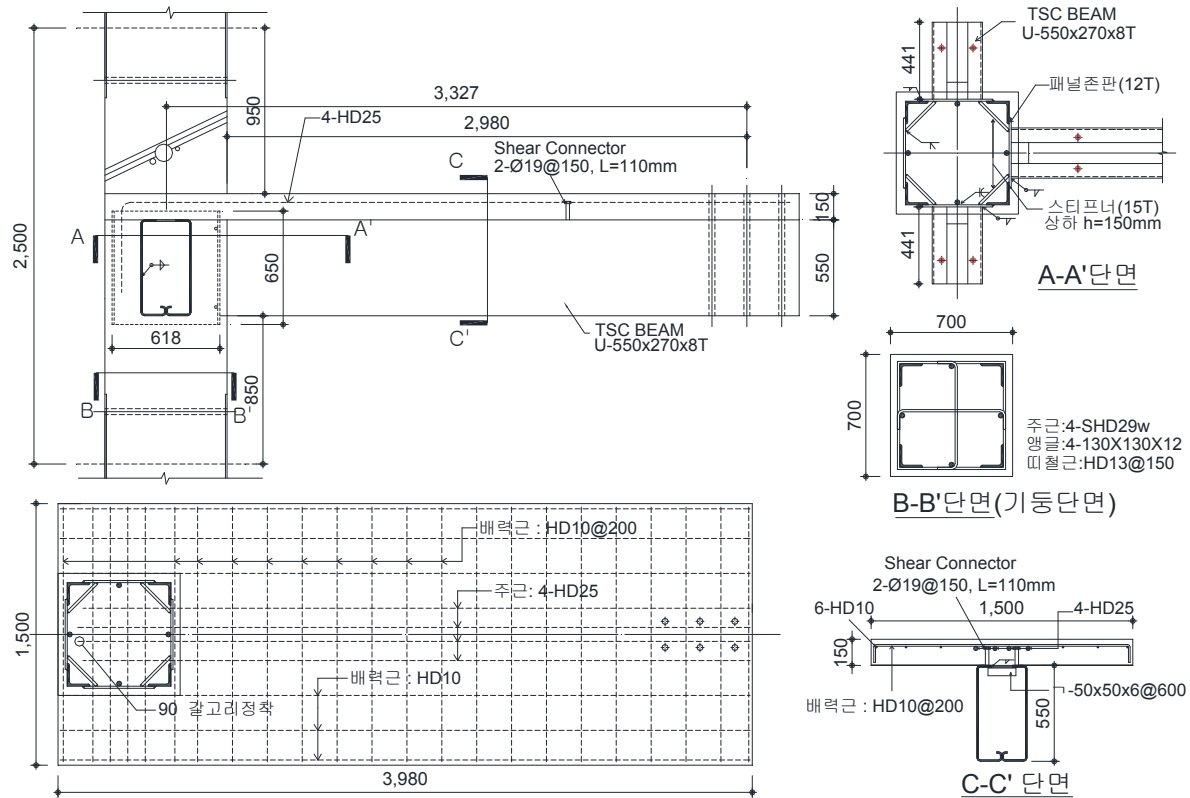
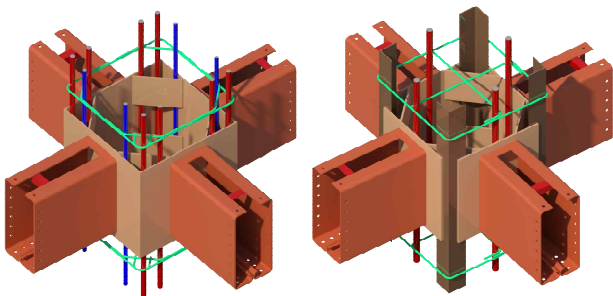


그림 5. 실험체-II 상세도면

조합을 다이어그램으로 나타낸 것이다. 여기서 그림 7(a)와 같이 연직하중에 의해 생긴 단부의 부모멘트는 그림 7(b)의 횡하중에 의해 발생한 모멘트와 조합하면 그림 7(c)와 같이 한쪽의 부모멘트는 증가하고 반대쪽의 부모멘트는 줄어들거나 연직하중의 크기에 따라 일부 정모멘트로 바뀌기도 한다. 즉 하중조합에 의한 보 설계시 단부의 정모멘트가 상당히 작은 것을 알 수 있다.



(a) PRC기둥과 TSC합성보 접합부 (b) PSRC기둥과 TSC합성보 접합부
그림 6. 기둥-보 접합부의 3D

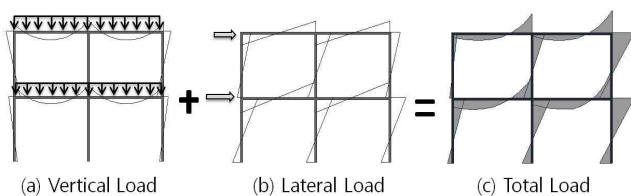


그림 7. 연직하중과 횡하중의 하중조합

TSC 합성보는 일반적으로 정모멘트 내력이 부모멘트 내력보다 충분히 크기 때문에 지진하중이나 풍하중에 의한 설계시 정모멘트의 하중을 단부에서 모두 전달하도록 패널존을 설계하는 것은 비경제적이다. 따라서 보-기둥 접합부의 설계시 TSC 합성보의 부모멘트 내력은 100% 지지하고 TSC 합성보의 정모멘트 내력에 대해서는 일부 하중만 받도록 설계하는 것이 합리적이다.

위 설계개념에 따라 TSC 합성보 설계시 정모멘트와 부모멘트에 대한 휨내력을 각각 다음의 식(5)와 식(6)과 같이 설계하였고, 그림 8과 그림 9는 설계개념도이다. 여기서 그림 8과 식 (5)는 상부 철근이 인장을 받고 TSC 강재와 내부콘크리트가 압축을 받는 시스템으로 보-기둥접합부가 TSC 합성보의 부모멘트 내력을 모두 받을 수 있도록 설계하는 것이고, 그림 9와 식 (6)은 상부콘크리트 슬래브가 압축을 받고 스티프너가 인장을 받도록 설계하여 패널존이 지배적인 내력이 되도록 설계하는 개념이다.

-부모멘트 내력 산정식

$$M_{n-} = C_c \times L_{cl} + C_s \times L_{c2} + T_s \times L_{t1} + T_{sr} \times L_{t2} \\ (C_c + C_s = T_s + T_{sr}) \quad (5)$$

-정모멘트 내력 산정식

$$M_{n+} = C_c \times L_c + T_s \times L_t \quad (C_c = T_s) \quad (6)$$

여기서, C_c 와 C_s 는 각각 콘크리트와 철골의 압축력이고, T_s 와 T_{sr} 는 각각 철골과 철근의 인장력이다. 또한 L_c ,

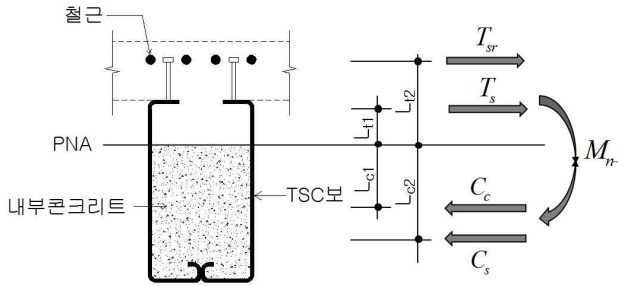


그림 8. 부모멘트 설계개념도

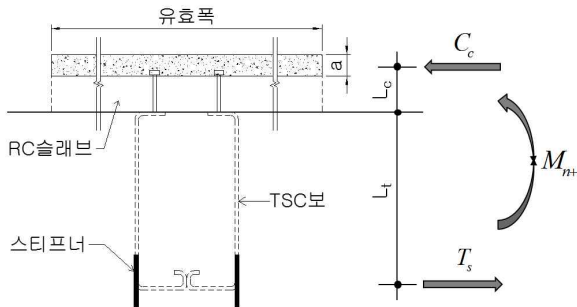


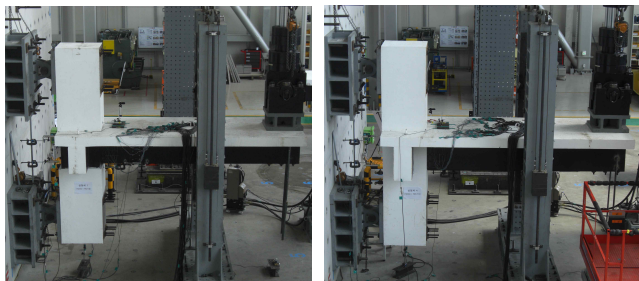
그림 9. 정모멘트 설계개념도

L_{c1} , L_{c2} 와 L_t , L_{t1} , L_{t2} 는 각각 그림 8과 그림 9와 같이 압축력과 인장력이 소성중립축(PNA)과 이루는 거리이다.

즉, 본 실험체는 보-기둥 접합부 성능이 중간모멘트골조의 내진성능을 만족하는 층간변위각 2.0%를 발휘하도록 하기 위하여 보단부에 발생하는 부모멘트에 대해서는 보의 단면성능에 의해 지배되도록 설계하고 지진하중이나 태풍과 같은 재현주기가 긴 하중에 의해 보에 발생하는 정모멘트에 대해서는 패널존에 의해 지배되도록 설계하였다. 그로 인해 정모멘트에 의한 소성힌지 위치와 부모멘트에 의한 소성힌지의 위치가 다르기 때문에 반복하중이 발생하더라도 소성힌지에서의 급격한 내력저감을 방지할 수 있는 장점이 있다.

2.3 실험체 가력 및 계측계획

그림 10과 그림 11은 각각 실험체 설치형상과 계측기 설치위치이다. 2,000kN의 용량과 ± 300 mm의 가력범위를 갖는 액추에이터를 보 단부에 설치하여 연직방향으로 상하가진 하였으며 기둥의 각 단부는 반력벽에 편지지로 설치하였다. 그림 11에서 ①~⑨는 LVDT의 각 번호를 의미하



(a)실험체-I

(b)실험체-II

그림 10. 실험체 설치형상

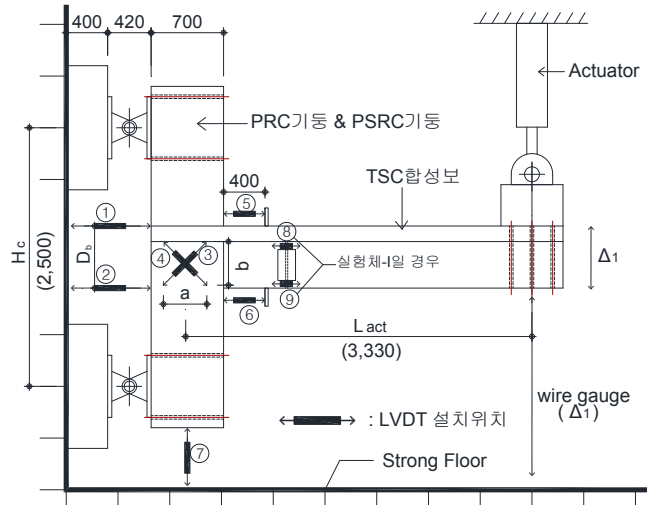


그림 11. LVDT 설치위치도

는데 그 중 ⑧번과 ⑨번은 보 이음부의 미끄러짐을 계측하기 위한 것으로서 실험체-I에서만 계측하였다. 각 LVDT들은 패널존 회전각, 보회전각, 기둥회전각, 그리고 전체회전각을 산정하기 위해 사용되었는데 각각의 계산식은 식 (7)~(10)이며, 여기서 산정한 값들의 단위는 radian이다.

$$\text{-패널존 회전각: } \gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab} (\delta_3 - \delta_4) \quad (7)$$

$$\text{-기둥 회전각: } \theta_c = \frac{\delta_1 - \delta_2}{D_b} - \gamma \left(1 - \frac{D_b}{H_c} \right) \quad (8)$$

$$\text{-전체 회전각: } \theta_{total} = \frac{\delta_{total}}{L_{act}} \quad (\delta_{total} = \Delta_1 - \delta_7) \quad (9)$$

$$\text{-보 회전각: } \theta_b = \theta_{total} - \gamma - \theta_c = \frac{\delta_5 - \delta_6}{D_b} \quad (10)$$

여기서, $\delta_1 \sim \delta_9$ 는 각각 그림 11에서 LVDT ①번~⑨번에 의해 계측된 변위이고, a와 b는 각각 패널존의 폭과 높이이다. 또한 H_c 와 L_{act} 는 각각 기둥지지점 사이의 거리와 가진 위치에서 기둥 중심까지의 거리이고, D_b 는 TSC 합성보의 높이이다.

표 2는 내진접합부 실험을 위한 가력하중의 층변위각과 주기이다. 여기서 중간모멘트골조를 만족하기 위해서는 층간변위각 0.02에서 정모멘트와 부모멘트 모두 TSC 합성보 공칭강도의 80% 이상을 유지해야 한다.

표 2. 가력하중 프로그램

하중 단계	층변위각 (rad.)	주기 (cycles)	가력변위 (mm)	하중 단계	층변위각 (rad.)	주기 (cycles)	가력변위 (mm)
1	0.00375	6	12.5	7	0.03	2	99.9
2	0.005	6	16.7	8	0.04	2	133.2
3	0.0075	6	25.0	9	0.05	2	166.5
4	0.01	4	33.3	10	0.06	2	199.8
5	0.015	2	50.0	11	0.07	2	233.1
6	0.02	2	66.6	12	0.08	2	266.4

3. 해석결과

본 단원에서는 강재와 콘크리트의 비선형성을 고려하여 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS¹¹⁾로 해석을 하였다. TSC 강재와 철근의 비선형성은 공칭항복강도 이후 직선으로 항복하는 이선형 거동으로 고려하였으며, 콘크리트는 damaged plasticity로 모델링하였고, 인장강도는 압축강도의 1/10을 적용하였다. 메쉬의 방법으로는 wedge element C3D6 : 6-node linear triangular prism을 적용하여 해석을 하였다. 단 ABAQUS를 이용한 비선형 해석은 실험체-I에서만 수행하였으며, 그림 12는 슬래브 콘크리트를 숨긴 ABAQUS 해석모델이다.

표 3은 설계결과와 해석결과이다. 설계결과는 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 산정한 정모멘트와 부모멘트 공칭강도이고, 해석결과는 ABAQUS에서 하중변위 곡선 중 소성구간의 시작 지점에서의 하중을 모멘트로 변환한 값으로 4장에서 상세하게 설명하였다. 표 3에서 해석결과가 설계결과와 상당히 일치하지만 정모멘트와 부모멘트 모두 해석결과가 설계결과보다 약 5.0~7.0% 정도 큰 것을 알 수 있다. 이것은 설계시 콘크리트 인장강도는 전혀 고려되지 않지만 해석시는 인장강도를 압축강도에 1/10로 고려하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 13과 그림 14는 각각 기둥-보 접합부에 부모멘트와 정모멘트를 일으키는 하중을 가한 후 하중 변위 이력 곡선에서 소성으로 넘어가는 지점에서의 응력분포와 부재 변형을 나타낸 것이고, 4장의 그림 15는 그에 따른 이력곡선이다.

그림 13은 TSC 합성보와 기둥의 접합부에 부모멘트가 발생하는 모습인데 TSC 하부플랜지가 압축을 받고 패널 존 강판으로 보강된 기둥의 콘크리트로 지압을 통해 전달되며, 상부철근과 상부플랜지가 인장력을 지지하는 것을 알 수 있다. 여기서 패널존과 이격된 TSC 내에서 항복구

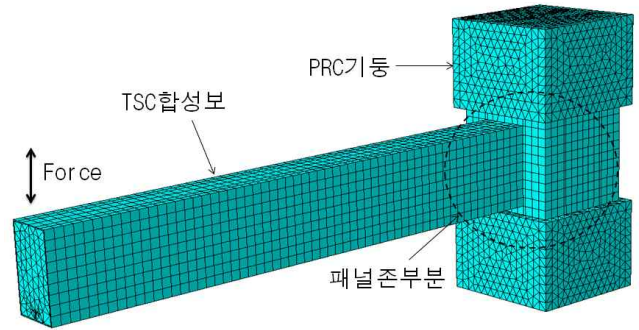


그림 12. 유한요소 해석모델(ABAQUS)

표 3. TSC 합성보 설계결과와 해석결과 비교

공칭 모멘트	실험체-I		실험체-II
	설계결과 (kN · m)	해석결과 (kN · m)	설계결과 (kN · m)
정모멘트	650.4	686.0	952.2
부모멘트	764.2	817.5	1,179.2

간이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있으며 결국 전단면이 항복에 이른다. 즉, 부모멘트에 의한 소성구간의 위치를 확인할 수 있다.

그림 14에서 스티프너가 항복하였고 TSC 강재 하부 플랜지로 점차 확대되는 것을 볼 수 있고, 2장의 그림 9에서 나타낸 것과 같이 콘크리트가 압축을 받고 스티프너가 인장을 받는 개념으로 설계된 것을 확인 할 수 있다. 그리고 소성 후 계속적인 인장력의 증가로 인해 TSC 하부플랜지 중앙부분이 부풀어 오르는 것을 확인 할 수 있다.

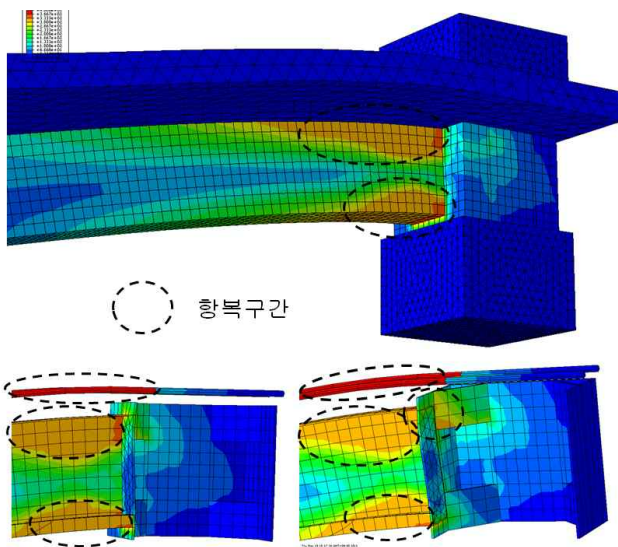


그림 13. 부모멘트 발생시 접합부의 응력분포 및 변형

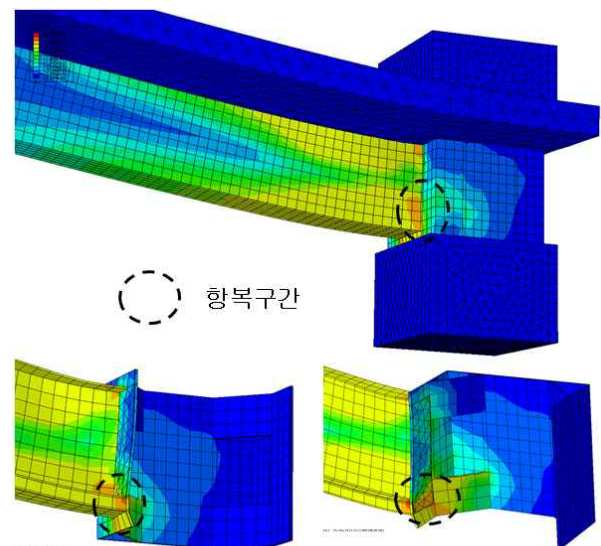


그림 14. 정모멘트 발생시 접합부의 응력분포 및 변형

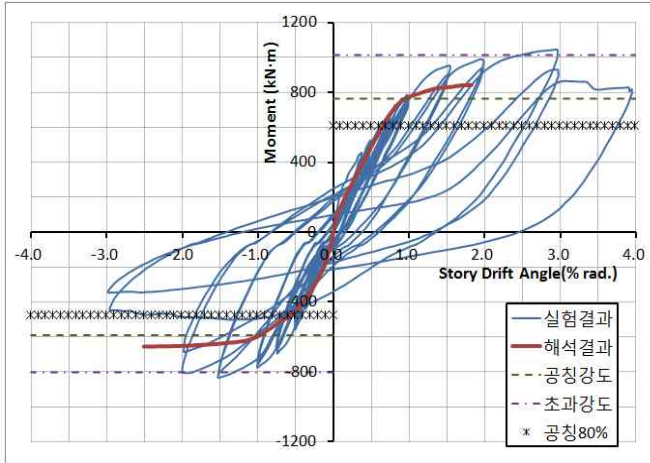


그림 15. 실험체-I 중간변위각과 모멘트

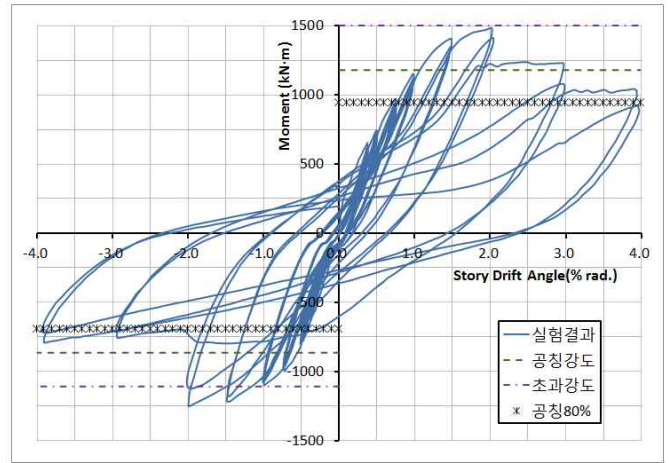


그림 17. 실험체-II 중간변위각과 모멘트

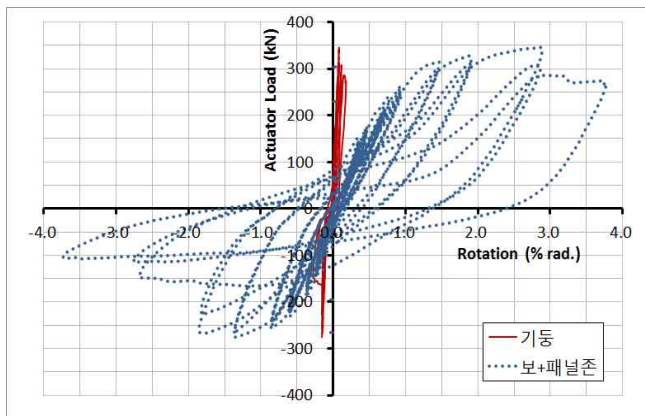


그림 16. 실험체-I 각 성분의 중간변위각

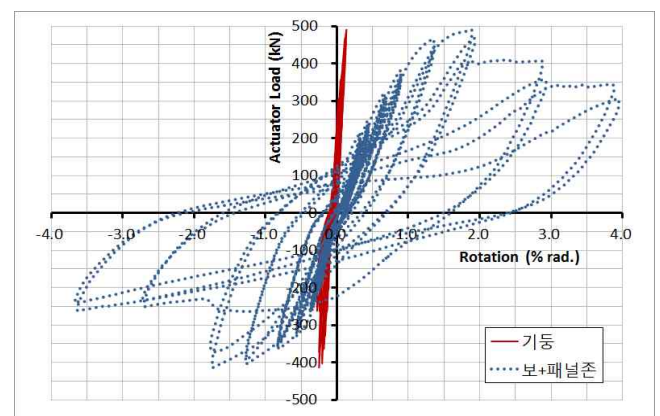


그림 18. 실험체-II 각 성분의 중간변위각

4. 실험결과

그림 15와 그림 16은 실험체-I, 즉 PRC 기둥과 TSC 합성보 접합부의 반복가력 시험결과와 해석결과이고 그림 17과 그림 18은 실험체-II, 즉 PSRC 기둥과 TSC 합성보의 접합부 실험결과이다. 여기서 X축의 증변위각은 엑추에이터 가진변위와 실제 보에 발생하는 변위가 실험지그의 미끄러짐과 오차로 인하여 일치하지 않기 때문에 그림 11에서와 같이 보 단부에 와이어게이지를 설치하고 매 사이클마다 피드백하여 기준에서 제시한 정확한 가력이 될 수 있도록 하였다. 또한 그림 15와 17의 Y축 모멘트는 엑추에이터 가진력에 보끝단에서 기둥표면까지를 곱해서 계산한 값으로 접합부에 발생하는 휨모멘트를 의미한다. 그림 15와 그림 17에서 공칭강도 그래프는 재료의 공칭강도를 식 (5)와 식 (6)에 적용하여 계산한 결과이고 초과강도 그래프는 표 1에 나타난 콘크리트 공시체 시험결과와 강재의 소제시험결과를 적용하여 산정한 값이다. 또한 그림 15에서 해석결과는 위의 3장에서 서술한 것과 같이 유한요소 해석결과이다. 모든 그래프에서 위쪽은 보단부 엑추에이터의 하향가력, 즉 접합부의 부모멘트이고, 아래쪽 그래프는 보단부에서 엑추에이터의 상향가력, 즉 접합부의 정모멘트 가력을 의미한다.

그림 15는 실험체-I의 중간변위각과 휨모멘트 그래프로,

실험결과 정 부 모멘트 모두 2.0% radian의 중간변위각까지 공칭강도의 80%이상의 내력을 유지한다. 이 시험결과는 KBC2009의 중간모멘트골조 기준을 만족하는 것이다. 특히 그래프 위쪽의 부모멘트는 3.0% radian 이상까지 충분한 내력을 발휘하는 것을 알 수 있다. 하부의 정 모멘트는 3.0%에서 급격히 하중이 떨어진다. 이것은 스티프너와 TSC 하부플랜지가 인장에 의해 파단된 결과이다. 실험결과 그래프가 해석결과 그래프와 탄성구간 내에서 기울기와 이력거동이 거의 일치하는데, 최댓값에서 실험결과가 더 큰 이유는 유한요소 해석결과에서는 재료의 초과강도를 고려하지 않았기 때문이다. 또한 해석결과 그래프에서 소성구간으로 전환되는 지점이 수식에 의해 산정한 공칭강도 그래프와 거의 일치하는데 이것은 3장의 표 3에서 재확인 할 수 있고 실험결과의 최댓값은 재료의 초과강도를 반영한 초과강도 그래프와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 기준에서 주어진 중간모멘트 골조의 요구중간변위각인 2.0% radian은 1.0% radian의 탄성변형과 1.0% radian의 비탄성변형의 합을 의미하는데 실험결과 그래프에서 1.0% radian까지는 탄성변형을 유지하다 그 이상부터 소성을 나타내었다.

그림 16은 실험체-I의 증변위각을 보와 패널존, 그리고 기둥의 회전각으로 분리한 그래프이다. AISC 358-05, Section J10.6^[2]에서는 패널존의 소성을 허용하고, 본 실험



그림 19. 실험결과 (실험체-I)



그림 20. 실험결과 (실험체-II)

체의 보-기둥 접합부의 특성상 보와 패널존의 회전각을 각각 분리하기 곤란하기 때문에 기둥회전각만 분리하였다. 여기에서 기둥의 층간변위각은 이력곡선에서 알 수 있듯이 탄성변형이며 약 0.2% radian이다. 즉, 모든 소성변형은 보와 패널존에서 발생하였다.

그림 17은 실험체-II의 층간변위각과 휨모멘트이다. 정부 모멘트 모두 2.0% radian 이상의 층간변위각이 발생할 때까지 강도저감 없이 공칭강도의 80%이하로 내력이 감소되지 않았는데, 이것은 중간모멘트골조 기준을 만족하는 결과이다. 단, 실험체-I의 결과와 달리 3% 층간변위각에서 부모멘트를 의미하는 위쪽 그래프에서 하중이 갑자기 일정한 크기로 줄어들었다. 이것은 슬래브 내의 주철근 한 개가 파단되었기 때문으로 추정되며 실험 당시 파단소음으로 알 수 있었다. 하지만 이후에도 공칭강도의 80%이하로 내력이 감소되지는 않았다. 정모멘트를 의미하는 아래쪽 그래프는 3.0% radian에서 강도가 급격히 저하되었는데 이는 하중을 가장 많이 받는 패널존 내부 스틱프너의 파단으로 추정된다. 부모멘트와 정모멘트 모두 공칭강도 부근부터 소성구간이 시작되었고 최대강도는 초과강도 그래프 부근에서 발생했다. 즉 실험결과와 공칭 및 초과강도 계산결과가 거의 유사하다.

그림 18은 그림 17의 실험결과 그래프를 기둥변위각과 보와 패널존 변위각으로 분리한 것이다. 그림 16과 유사하게 기둥은 약 0.2% radian의 층간변위각을 나타내었고 소성이 발생하지 않았다. 실험체-II도 대부분의 탄성변위와 모든 소성변위가 보와 패널존에서 발생하였다.

그림 19는 실험체-I 실험결과와 각 단계별 그림이다. 1.0%의 층간변형에서 상부슬래브의 균열이 발생하여 층간

변형각이 증가함에 따라 계속 진행되었으며, 2.0%의 층간 변형각부터 패널존을 구속하고 있는 기둥면에서 균열이 발생하였다. 그리고 3.0%에서 스틱프너와 TSC하부플랜지가 파단되었다. 이것은 그림 16의 층간변위 그래프의 내력 감소로 알 수 있다. 또한 4.0%에서 상부철근 파단과 기둥면의 콘크리트가 박락되었다.

그림 20은 실험체-II의 실험결과이다. 실험체-I과 유사하나 콘크리트가 패널존을 감싸고 있기 때문에 패널존과 TSC의 파단시점을 육안으로 알 수 없지만 그림 18의 층간변위 그래프에서 실험체-I과 같이 3.0%에서 패널존이 파단한 것으로 판단된다.

실험체에 변형률 게이지를 여러 개 설치하여 TSC 강재와 슬래브 철근, 그리고 기둥-보 접합부의 변형률을 계측하였다. 그 중 그림 21은 그림 22의 우측 상부 그림과 같이 실험체-I에 대한 기둥면에서 50mm 떨어진 지점의 위치별 변형률 결과값이며들을 정리한 그래프이다. TSC 합성보의 상부에서부터 순서대로 슬래브철근, TSC 상부플랜지, TSC 웹-1, TSC 웹-2 그리고 TSC 하부플랜지로 나타내었다. 그 중 TSC 웹-1은 TSC 강재의 1/2높이에서 계측한 값이고 TSC 웹-2는 TSC 하부면에서 50mm 떨어진 위치의 웹에서 계측한 결과이다. 여기서 그래프 상부는 보-기둥접합부에 부모멘트가 작용할 때이고 하부는 정모멘트가 작용할 때이다. 또한 그림 22는 실험체-I의 상부와 하부의 스틱프너 변형률 그래프이다.

실험체-I의 실험결과인 그림 21에서는 패널존에 부모멘트가 발생할 때에는 철근에 큰 인장변형률이 발생하고, TSC 하부 플랜지와 TSC 웹-2에 압축변형률이 작용하는 것을 알 수 있다. 정모멘트가 발생할 경우에는 TSC

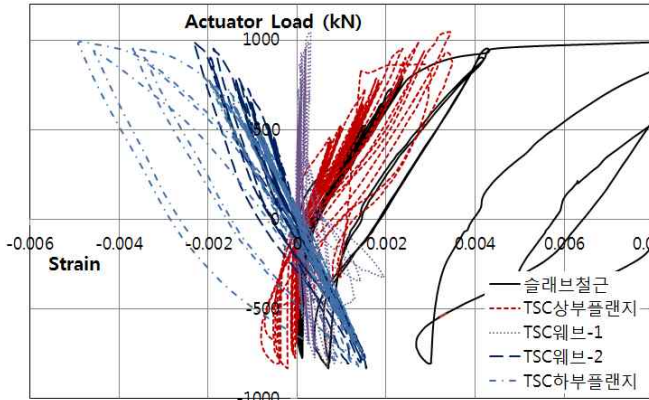


그림 21. TSC 변형률(실험체-I)

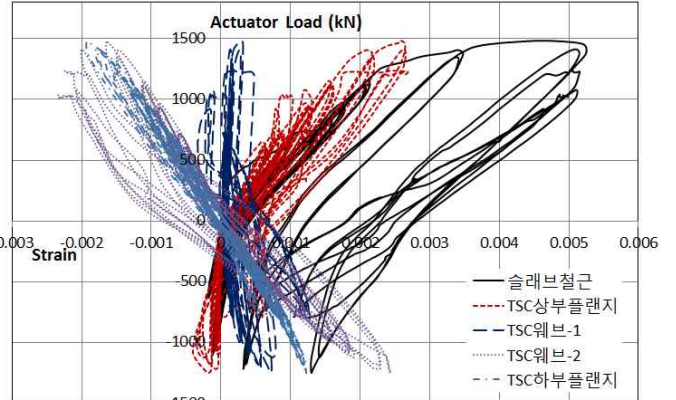


그림 23. TSC 변형률(실험체-II)

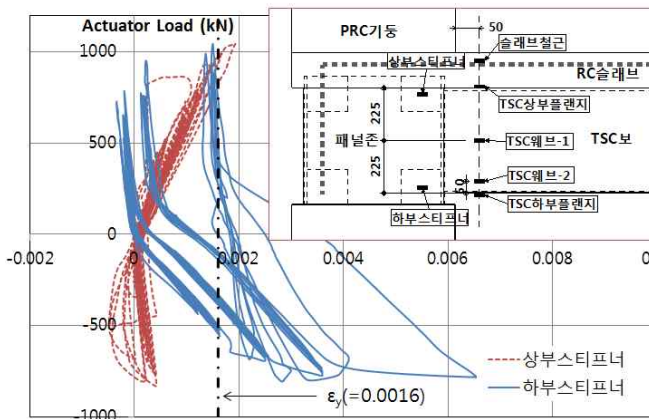


그림 22. 스티프너 변형률(실험체-I)

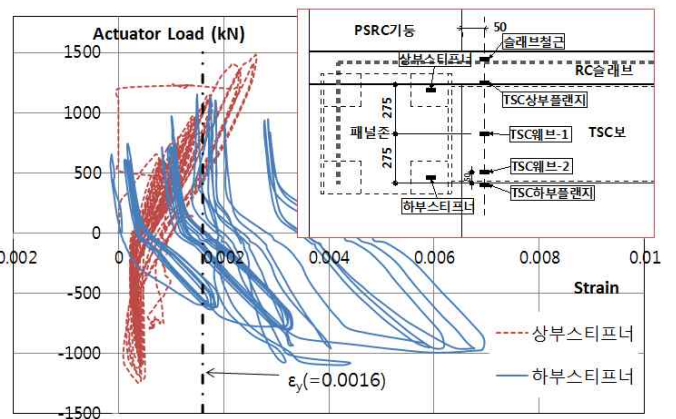


그림 24. 스티프너 변형률(실험체-II)

하부플랜지와 TSC 웹-2에 인장 변형이 발생하였다. 그러나 TSC웹-1의 위치에서는 부모멘트가 발생할 때에는 변형률이 0에 가깝게 나타났는데 이것은 부모멘트에 의한 중립축위치를 의미한다. 또한 정모멘트에 의해서는 초기에 TSC상부플랜지에 변형률이 거의 0으로 타났는데 그것은 TSC상부플랜지가 정모멘트의 중립축에 가까움을 의미한다.

그림 22의 상하부 스티프너 변형율에서 초기 항복전 부모멘트가 발생하는 경우에는 상부스티프너에 인장변형이 발생하였고 하부스티프너는 콘크리트가 압축을 지지하므로 압축변형이 거의 발생하지 않았다. 하부스티프너가 항복 후 항복변형이 급격히 커졌으며 패널존에 부모멘트가 발생하더라도 일부 변형률이 줄어들기는 하지만 항복변형을 이하로는 회복되지 않았다.

그림 23과 그림 24는 그림 21과 그림 22와 같은 방법으로 실험체-II에 대한 변형률 실험결과를 정리한 그래프이다. 그림 23에서도 그림 21과 같이 패널존에 부모멘트가 발생함에 따라 슬래브철근과 TSC상부플랜지는 인장변형이 발생하였으며 TSC하부플랜지와 TSC웹-2에는 압축변형이 발생하였다. 또한 정모멘트가 발생한 때에는 철근을 제외하고 모든 부위에서 부모멘트가 발생하는 경우와 반대의 변형이 발생하였다. 여기서 철근은 콘크리트 내에 있고 대부분의 압축은 콘크리트가 분담하기 때문에 압축변형은 미미하다. 또한 부모멘트 구간에서는 TSC웹-1의

변형율이 0에 가까웠으며 정모멘트 구간에서는 TSC 상부플랜지의 변형율이 0에 가깝게 나타났다. 즉, 실험체-I과 실험체-II 모두 정 부모멘트에 따라 중립축의 위치가 변함을 의미한다.

그림 24에서는 실험체-I의 실험결과와 거의 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있는데, 상부 스티프너는 부모멘트 작용시 인장을 지지하지만 정모멘트가 발생할 경우에는 콘크리트에 의하여 압축변형이 거의 발생하지 않는다. 하부스티프너도 상부스티프너와 같이 압축변형이 거의 발생하지 않고, 인장에 의해 항복이 발생한 후에는 재하하중의 증가에 따라 하부 스티프너 변형률의 단계별 증가와 회복이 뚜렷하게 나타났다.

5. 결 론

특수모멘트골조는 설계시 자주 사용하지 않을 뿐 아니라 이미 이에 대한 내진접합부 실험을 수행하였기 때문에 본 연구의 목표는 선조립기둥의 제작성과 시공성을 고려하여 중간모멘트골조 내진접합부 상세를 개발하는 것이다.

보-기둥 접합부의 설계방법으로서, 횡하중 작용시 접합부에 작용하는 하중은 일반적으로 TSC 합성보의 전내력을 필요로 하지 않으므로 그에 맞도록 접합부를 설계하였다. 즉 TSC 합성보와 PRC 및 PSRC 기둥의 접합부가 좀 더 효율적으로 횡력에 견딜 수 있도록 배려하였다.

본 연구에서는 용접용 철근을 사용한 철근 선조립(PRC)기둥과 철골 철근 선조립(PSRC)기둥에 각각 TSC 합성보를 접합한 접합부 내진성능을 해석과 실험으로 각각 검증하였는데 그 내용은 다음과 같다.

(1) 내진접합부실험은 건축구조기준(KBC 2009)에서 제시하는 방법에 따라 가력하중과 주기를 선정하였으며 그 결과를 중간모멘트골조 기준에서 요구하는 2.0% 층간변위각에서 80% 이상의 내력저감 유무로 판단하였다.

(2) 유한요소 해석결과에서는 보-기둥접합부에 부모멘트가 작용할 경우, 보의 소성이 TSC 강재내에 위치하였고, 정모멘트가 발생할 경우에는 패널존 강판에 소성이 발생하였다. 즉, 정모멘트는 패널존이 설계내력을 지배하였다. 또한 유한요소 해석결과가 수식에 의한 계산결과와 일치하였다.

(3) TSC 합성보와 PRC 및 PSRC 기둥의 내진접합부 성능실험결과 정 부 모멘트 모두 2.0% radian의 층간변위각까지 공칭강도의 80%이상의 내력을 유지하였다. 이것은 KBC2009의 중간모멘트골조 기준을 만족하는 결과이다. 여기에서 기둥의 회전각은 약 0.2% radian 이었고, 모든 소성변형은 보와 패널존에서 발생하였다.

(4) 본 연구결과에서 보-기둥 접합부에 부모멘트가 발생할 경우에는 2.0%의 층간변위각 이후에도 내력이 급격히 저하되지 않고 상당한 이력거동을 나타내었는데 정모멘트가 발생하는 경우에는 급격한 강도 저하가 발생하였다. 추후 패널존의 연성능력을 증대시킬 수 있는 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학협력 기업부설연구소 지원사업(No.00045821)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

1. Leon, R. T.(1998) Composite connections, Structural Engineering and Materials, Construction Research Communications, Vol.1, No.2, pp. 159-169.
2. Xiao, Y., Choo, B. S., and Nethercot, D. A. (1994) Composite Connections in Steel and Concrete.I. Experimental Behavior of Composite Beam-Column Connections, Journal of Constructional Steel Research, ELSEVIER, Vol. 31, No.1, pp.3-30.
3. Anderson, D. and Najafi, A. A. (1994) Performance of Composite Connections: Major Axis End Plate Joints, Journal of Constructional Steel Research, ELSEVIER, Vol. 31, No. 1, pp. 31-57.
4. 내화구조인증서, 제 09-129호, 인증번호: BS09-0928-1a, 한국건설기술연구원장.
5. 김성배, 함정태, 이창남, 김상섭, SRC 기둥-TSC 보접합부의 거동에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제22권, 제6호, pp. 55-62, 2006

6. 박홍근, 이철호, 박창희, 황현중, 이창남, 김형섭, 김성배, 콘크리트채움 U형 강재보-강재기둥합성 내진접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권 3호, pp. 337-347, 2011
7. 박창희, 이철호, 박홍근, 황현중, 이창남, 김형섭, 김성배, 콘크리트채움 U형 합성보-H형강기둥 십자형 합성접합부의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권 4호, pp. 503-514, 2011
8. 송진아, 박홍근, 이창남, 엄태성, PRC 보-기둥 접합부의 내진성능, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 2011.10
9. 황현중, 박홍근, 이철호, 박창희, 이창남, 김형섭, 김성배, 콘크리트채움 U형 강재보-콘크리트 기둥 접합부의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권 1호, pp. 83-97, 2011
10. 대한건축학회(2010) 건축구조기준 및 해설(KBC2009) 기문당.
11. ABAQUS/Standard user's manual version 6.5. Pawtucket (RI): Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.; 2005.
12. American Institute of Steel Construction (AISC) (2005) Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago.

(接受: 2012. 1. 3)