



외다이아프램 응력경로에 따른 용접조립 각형기둥-보 접합부의 내진성능 평가

김선희¹ · 염경수² · 최성모^{3*}

¹공학박사, 서울시립대학교, 건축학부 ²소장, (주)하모니구조엔지니어링 ³교수, 서울시립대학교, 건축학부

Seismic Evaluation of Welded-formed square Column-Beam Connection for External Diaphragm Stress path

Kim, Sun Hee¹, Yom, Kyong Soo², Choi, Sung Mo^{3*}

¹Ph.D., Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

²President, Harmony Structural Engineering, Seoul, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Abstract - Concrete filled tubular structure should be installed diaphragms for moment connection. However internal and through diaphragm should be special welded when connected to column tube. The other hand, that has become increase of stress concentration and extend of construction error. Therefore, In this study the seismic performance of beam to column connections with External Diaphragms and implement cycle loading experiment. we had evaluated seismic performance with mentioned experiment which is concrete filled or not, variable shapes, to be welded or not of diaphragm. Also, formula of strength of external diaphragm was analyzed and looked into adequacy with regard to formula of tension strength.

Keywords - Stress path, External diaphragms, Cyclic loading, Moment-rotation angle curve, Connection detail

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

폐단면 형태의 기둥-보 접합부는 H형강 기둥에 비해 다소 복잡한 구성을 갖게 되어 기술적 자료와 경험이 부족한 현장에 적용에 있어 어려움이 많다^[1]. 특히 CFT(Concrete Filled steel tube)의 경우 강접합으로 이루어질 경우 발생할 수 있는 면외변형 방지를 위해 다이아프램이 추가 설치된다. 다이아프램은 제작 및 시공이 용이하지 않아 제작과 관

련된 철구제작소 등의 제반시설이 확립되어 있지 않은 현장에서 적용상의 문제점은 지금까지 지적되고 있다. 즉 폐단면의 기둥-보 접합형식의 상세 선택에서 자유롭지 못하다. 또한 보플랜지의 내력전달에서 강관과 보플랜지 용접 및 강관과 다이아프램 용접이 접합부의 내력저하에 영향을 미칠 수 있으므로 기둥에 대한 용접을 최소화 할 수 있는 새로운 접합상세는 개발되어야 한다^{[2],[3]}. 외다이아프램 접합상세 대한 일련과정의 연구로 본 연구실에서는 용접조립 각형 강관기둥의 접합부 상세를 결정을 위한 유한요소해석과 단순인장 실험을 수행하였다. 선행된 연구 결과를 토대로 실대형 접합부 내진성능 실험을 수행하며, 접합부 타입을 외다이아프램으로 결정함에 있어서 국내·외 외다이아프램 설계식을 비교·검토 하고 용접 조립 각형강관에 적합한 새로운 외다이아프램 설계식을 제안하는 것이 목적이라 할 수 있다.

Note.-Discussion open until February 28, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 6, 2013; revised May 3, 2014; approved on July 4, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-2749

E-mail. smc@uos.ac.kr

1.2 선행된 외다이아프램 접합부의 단순인장평가^[4]

단순인장 접합부평가에 주요 변수는 기둥-보플랜지의 용접유무, 기둥-다이아프램의 용접량, 콘크리트 충전 여부, 기둥형상(기둥 내 앵커유무)으로 Fig. 1과 Table 1에서 정리된 총 9개의 구조실험이 진행되었다. 실험과 해석을 통해 나온 결론은 크게 5가지로 정리할 수 있다.

- (1) 기둥-보 플랜지 용접 유무와 관계없이 유사한 내력 및 강성을 발휘하므로 외다이아프램 접합 인장시 기둥-보 플랜지 간의 용접은 최소화하여도 내력에 영향을 미치지 않는다.
- (2) 기둥-다이아프램 용접 목두께를 6, 3mm로 변화했을 때 초기강성에서 약 17%차이가 있지만, 내력에서는 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 평가되었다.
- (3) 콘크리트 비충전 실험체는 충전실험체 대비 강성은 약 8%의 낮게 평가되었지만 내력에 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다.
- (4) 일반 각형강

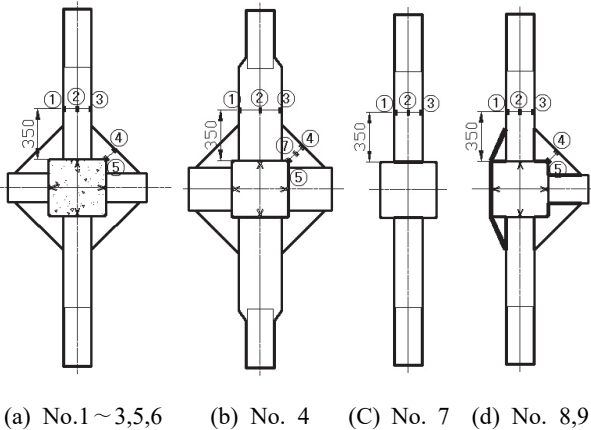


Fig. 1. Simple tensile detail of external diaphragm

관(CFT) 기둥과 용접조립 각형기둥의 비교에서는 초기강성 약7%, 최대내력 약 14% 향상되었으며, 기둥 내부 앵커는 강성과 내력을 증진시키는데 역할을 하는 것으로 평가되었다. (5) 얇은 강관의 기둥을 활용한 외다이아프램 폭 결정을 위해 설계식을 제안하였다. 제안된 외다이아프램 폭 결정 수식은 실험과 비교했을 때 안전측으로 검토되었으며, 유한요소 해석으로 응력분포의 검증도 이뤄져 신뢰성을 높였다.

1.3 외다이아프램 접합부 설계식

보 플랜지의 응력 전달에 있어 강관에 대한 영향이 상대적으로 작은 외다이아프램을 적용하여 Fig. 2와 같이 명쾌한 응력흐름을 유도하는 것이 가능하다. 그로인해 용접 등 시공 오차를 최소화 할 수 있다.

일본의 강관구조 설계 시공지침·동해설(1997)^[5] 및 철골철근 콘크리트 계산규준·동해설(1994)^[6]에서는 충전형 기

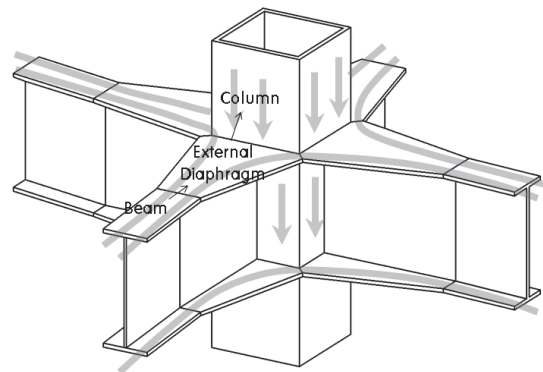
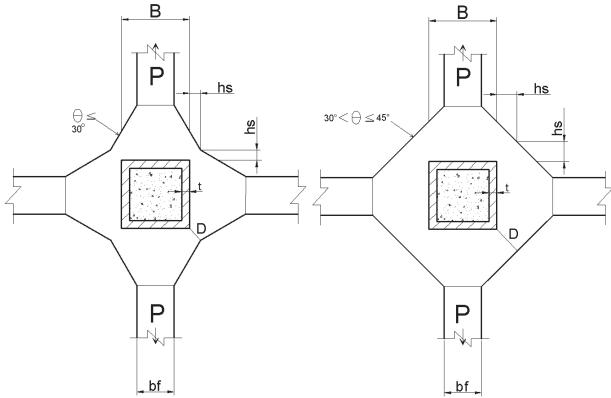


Fig. 2. Stress path of column to beam connection

Table 1. Specimen list of simple tensile^[4]

No.	Col. (SM490) □400×6	Flange (SS400)		Diaphragm (SS400)		Flange welded	Column-dia welded (): filler weld throat < >: plate width	30MPa Con'c Filled or not
		Wid.	Thick.	Wid.	Thick.			
1	Welded Built-up Square	200	16	135	16	○	1(6mm)	○
2		200	16	135	16	×	1	○
3		200	16	135	16	×	1/2	○
4		200	16	135	16	×	1	×
5		300	20	200	20	×	1	○
6		200	16	135	16	○	-	○
7	General	200	16	135	16	○	-	○
8	1~6	200	16	135	16	×	1 <120mm>	×
9	Same	200	16	135	16	×	1 <120mm>	○



(a) CASE 1 (b) CASE 2

Fig. 3. External diaphragm connection

등-보 접합부로서 Fig. 3과 같이 2가지 형식을 제시하며, 내력식을 규정하고 있다. Fig. 3(a)의 경우 허용인장력(P_a) 식 (1), (2)값 중 큰 값으로 결정되며, Fig. 3(b)의 경우 식 (2)에 의해 인장력을 산정한다.

$$P_a = 1.75 \left(\frac{t}{B}\right)^{0.67} \left(\frac{t_s}{t+h_s}\right)^{0.67} \left(\frac{t+h_s}{B}\right) B^2 \frac{F_{dt}}{Y} \quad (1)$$

$$P_a = 1.54 h_s t_s F_{dt} + 1.33 (4t + t_s) t F_{ct} \quad (2)$$

Matsui(1985)^[7]연구자는 외다이아프램 접합부 실험에서 일방향 가력시 강관의 모서리에서 다이아프램 끝단까지 대각선 방향의 응력을 연구하였다. 그 응력이 인장력과 전단력을 받을 때 항복강도를 기준으로 극한강도는 1.42배로 제시하고 있다. 외다이아프램 설계식은 (3)과 같다. Matsui, C의 내력식을 기준으로 현재 사용되고 식 (1), (2)와 비교해 보면 다이아프램으로 가해지는 하중이 매우 과다하게 안전율이 적용되고 있다. 즉, 일본의 강진지역의 특성을 고려한 결과로 판단된다. 외다이아프램은 앞서 언급됐듯이 내, 관통형 다이아프램에 비해 용접면이 노출되어 있으므로 시공오차 확률이 작다. 그럼에도 이중으로 안전율을 적용하여 과대 설계가 이뤄지고 있는 문제가 있다.

$$P_a = 1.42 \left(\frac{4}{\sqrt{3}} h_s t_s F_{dt} + 2(4t + t_s) t F_{ct}\right) \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)의 적용범위 :

$$\begin{aligned} t_s &\geq t_f, & 20 &\leq D/t \leq 50 \\ 0.75 &\leq t_s/t \leq 2.0, & h_s/sD &\geq 0.15t_f/t_s \end{aligned}$$

한편 Park(2008)^[8]연구에 의하면 Matsui(1985)가 제시한 기둥-보 접합부 외다이아프램 설계식에서 기둥-보 플랜지를 용접하지 않을 경우 보 플랜지로부터 오는 인장력을 외다이아프램만이 부담하는 것으로 하며, 강관의 부담을 배제한 만큼 외다이아프램폭을 증가시켜 식 (4)와 같이 제안하였다. 또한 기둥-보 플랜지를 용접할 경우 보 플랜지로부터 오는 인장력을 외다이아프램뿐 아니라, 기둥내부의 앵커와 동시에 작용하므로 식 (4)에서 콘크리트 합성효과를 추가한 식 (5)를 제안한 바 있다.

$$P_a = 1.42 \left(\frac{4}{\sqrt{3}} h_s t_s F_{dt} - 2(4t + t_s) t_c F_{ct}\right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_a &= 1.42 \left(\frac{4}{\sqrt{3}} h_s t_s F_{dt} - 2(4t + t_s) t_c F_{ct}\right) \\ &+ 2(l h_b f_t) \cos 45^\circ \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4), (5)의 적용범위 :

$$\begin{aligned} t_s &\geq t_f, & 20 &\leq D/t \leq 67 \\ 0.75 &\leq t_s/t \leq 2.0, & h_s/sD &\geq 0.15t_f/t_s \end{aligned}$$

위에 제시된 식을 토대로 외다이아프램 설계식의 변수에 있어 강관의 두께만을 변화시켜 폭두께비를 40~80까지 변화에 따른 내력의 차이를 검토해 보았다. 기둥 폭은 400mm으로 동일하게 적용하였다. Fig. 4와 같이 Matsui, C(1985) 제안된 내력식은 설계기준에 비해 약 2배가량의 내력차이를 나타내며, 폭두께비가 작을수록 절대 값 차이가 크게 나타나고 있다.

외다이아프램 내력식 중에 다이아프램 두께에 따른 내력 차를 보기 위해 Fig. 5와 같이 정리하였다. 다이아프램 두께

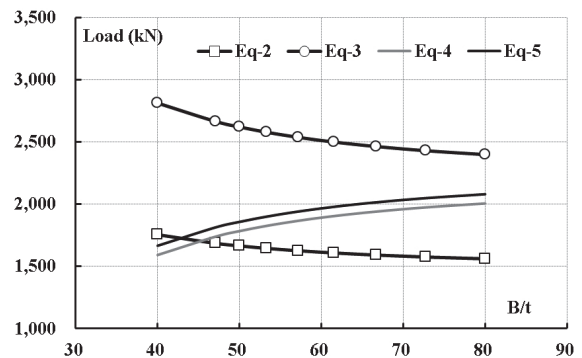


Fig. 4. Design strength according to B/t

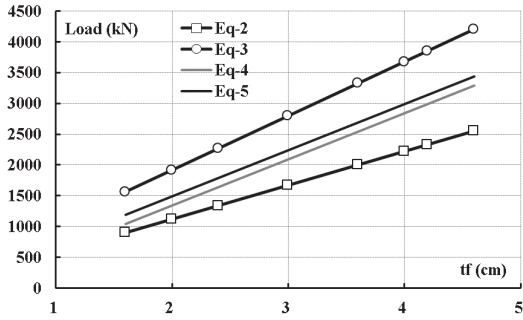


Fig. 5. Design strength according to external diaphragm thickness

를 변수로 내력을 비교해 보면 1차식으로 표현이 된다. 이때 기둥강관 두께는 6mm로 동일하며 기둥폭은 400mm로 폭두께비는 67이다. 마찬가지로 Matsui, C(1985) 제안된 내력식은 설계기준에 비해 약 2배가량의 내력차이를 나타내며, 그 비율은 변수의 증감에 상관없이 비교적 균일하게 나타나고 있다. 기준식의 외다이아프램 허용내력(Pa)과 Matsui, C (1985) 외다이아프램 설계식의 극한내력(Pa)의 차이로 기준에서는 실험 등의 경험적 수치를 바탕으로 하는 설계식 대비 2배가량 안전측으로 제시되고 있음을 인식할 필요가 있다. 따라서 Matsui, C(1985)의 외다이아프램 설계식을 바탕으로 얇은 강관으로 조립된 기둥의 특성을 감안한 새로운 외다이아프램의 허용 내력식을 제안할 필요가 있다고 판단된다.

2. 기둥-보 접합부 내진성능 평가

2.1 실험 개요

선행된(1,2절 참고) 변수비교를 통해 요구되는 접합부의 구조성능과 시공성을 만족하는 접합 상세를 설정하였다. 선

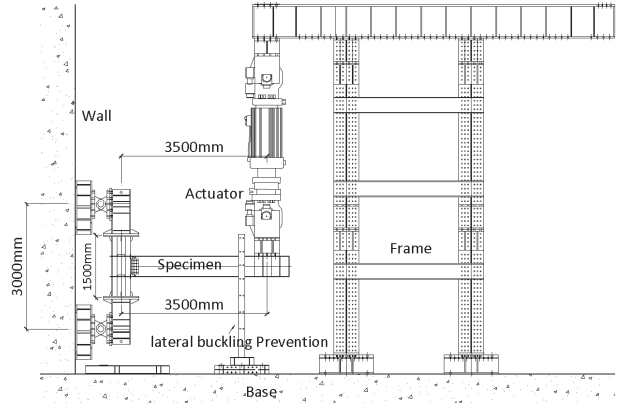


Fig. 6. Boundary condition

행연구를 고려하여 용접조립 각형강관 기둥-H형강 외다이아프램 접합부의 실험을 실시하고 이에 나타나는 실험 결과를 바탕으로 구조내력과 연성능력을 바탕으로 한 접합부 내진성능을 평가하고자 한다. 접합부 실험체는 총 6개이며 공통적으로 적용되는 사항으로 기둥은 SM490강재를 적용하였으며 강관 내부는 충전성을 고려하여 28일 압축강도 30MPa 고유동 콘크리트를 사용하였다. 실험체 일람과 형상은 Table 2에 정리하였다. 실험체 제작에 있어서 기둥의 용접은 E71T-1 ϕ 1.6mm 전극봉을 사용한 FCAM (Flux-Cored Arc Welding) 방식으로 행하였다. 이러한 용접방식은 국내의 공장용접에서 사용되는 가장 일반적인 방식으로 AWS (American Welding Society)의 기준에도 적합한 것이다. 또한 강관과 보 플랜지 간의 접합은 E7018 ϕ 1.8mm 전극봉을 사용한 SMAW(Shielded Metal Arc Welding) 방식을 사용하였다. 실험체는 Fig. 6과 같이 기둥-보 접합부 부위에 지진시 횡력이 가해진 골조를 재현하기 위해 기둥 상·하 끝단 플레이트를 반력벽에 설치한 힌지 지그에 연결

Table 2. Specimen list

Specimens	Column [SM490]	Beam [SS400]	External diaphragm				Column-Beam Welded		Column-Dia-Welded	30MPa Con'c Filled
			Upper	Bottom	Width (mm)	Thick. (mm)	Upper	Bottom		
F00XX	□-400×6	H-500×200×10×16	o	o	135	16	x	x	o	Filled
F0XX0	□-400×6	H-500×200×10×16	o	x	135	16	x	o	o	Filled
N00XX	□-400×6	H-500×200×10×16	o	o	135	16	x	x	o	Hollow
FTTXX	□-400×6	H-500×200×10×16	T-bar (120mm)	T-bar (120mm)	135	16	x	x	o	Filled
NTTXX	□-400×6	H-500×200×10×16	T-bar (120mm)	T-bar (120mm)	135	16	x	x	o	Hollow
F00XX*	□-400×9	H-588×300×12×20	o	o	200	20	x	x	o	Filled

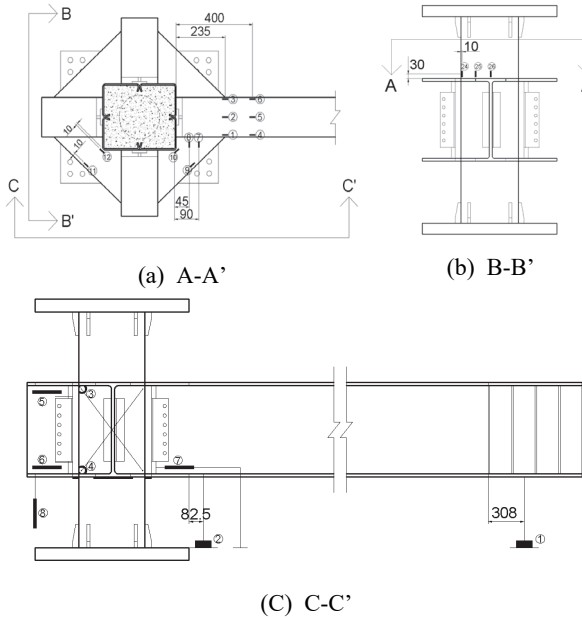
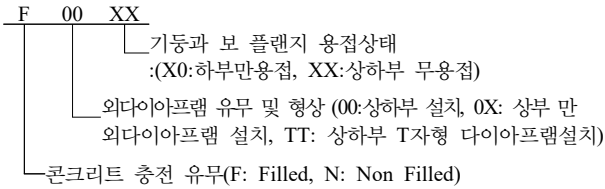


Fig. 7. Measurement location of strain gauge and LVDT



하고 가력 점에 상·하 반복 가력이 가능한 200tonf 용량의 액츄에이터를 부착하였다.

ANSI/AISC SSPEC-2010 Cyclic Loading Program^[9]에 의해 가력하였다. 하중 가력은 변위 제어로서 가력 방향에 정해 놓은 층간 변위각에 의해 조절된다. 보 끝단의 변위는 층간 변위각에 따라 보 단부의 가력중심에서 기동 중심까지의 거리를 이용하여 계산하였다. 변위측정계와 변형률 측정 계지는 전체적인 거동과 국부 변형을 알기 위해 변형 예상 지점에 설치하였다. 가력하중의 크기는 액츄에이터에 있는 로드셀에 의해 측정되며 연성 능력을 측정하기 위한 비탄성회전각은 Seismic Provisions for Structural Steel Building 규준에 의하여 기동의 중심선과 보의 중심선의 교차점에서 나타나는 비탄성거동을 예측하여 계산된다. Fig. 7은 기본 실험체 F00XX의 변위 측정계와 변형률 측정 계지의 위치를 도식화 하였다.

2.2 재료 시험 결과

본 실험에서 사용된 강재의 기계적 성질을 알아보기 위하여 KS B0802^[10] 규준에 따라 각각 3개씩 인장 시험편을 절

Table 3. Results of coupon test

Thpe	Gread	Thick. (mm)	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Fy/Fu (%)	Elongation (%)
Tube	SM 490	6	384	487	78.8	23.9
		9	431	533	80.1	22.7
Diaphragm		16	298	423	70.4	31.5
		20	302	432	69.9	22.9
H-web	SS 400	10	356	499	71.3	25.1
		12	303	419	72.3	27.5
H-flange		16	338	498	67.8	25.6
		20	275	406	67.7	29.8

Table 4. Compressive strength of cylinder

Cylinder size (Φ100x200)	Compressive strength (MPa)		
	7 Days	14 Days	28 Days
Average	13.70	17.05	22.05

취하여 인장 시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 재료는 SS400의 두께 10, 12, 16, 20mm와 SM490의 두께 6, 9mm의 강재이다. 각 시험편의 결과는 Table 3에 나타내었으며 또한 콘크리트 공시체에 대한 28일 압축강도 시험을 수행하였으며 시험결과는 Table 4와 같다.

2.3 기동-보 접합부 반복가력 실험 결과

각 실험체의 하중-변위 관계에서 항복하중을 결정하기 위해 가장 통상적으로 쓰이는 Fig. 8과 같이 1/3 접선법을 사용하였다^{[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17]}. 초기강성 기울기를 갖는 직선과 초기강성 기울기의 1/3인 직선을 평행이동 시켜 두 직선의 교점을 항복내력 P_y 로 정하였고 이때의 처짐을 항

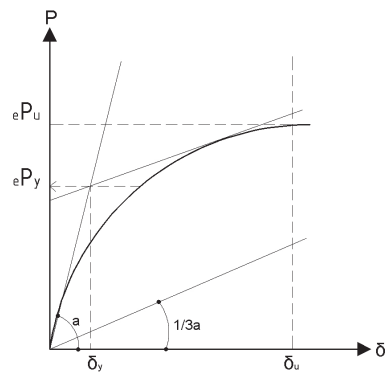


Fig. 8. Estimation method of initial stiffness and yield strength

복변위 δ_y 로 정한다. 다음 Table 5는 각 실험체 별 항복하중 (P_y) 및 항복변위(δ_y), 최대하중(P_u), 초기강성(K_i)을 나타낸 결과이다. 가력방향에 있어 '+'는 Negative, '-'는 Positive

Table 5. Test results of strength and stiffness

	P_y (kN)		δ_y (mm)		P_u (kN)		K_i (kN/mm)	
	+	-	+	-	+	-	+	-
F00XX	102	111	17.6	16.3	202	197	5.8	6.8
F0XX0	95	35	25.7	6.8	161	70	3.7	5.1
N00XX	68	79	18.3	14.3	164	162	3.7	5.5
FTTXX	90	96	20.6	11.5	203	186	4.4	8.3
NTTXX	101	112	18.6	20.3	181	175	5.4	5.5
F00XX*	214	202	15.3	18.9	277	276	14.0	10.7

Table 6. Seismic Frame Performance Criteria

Frame Classifications	Connection plastic rotation capacity (rad)
Ordinary Moment Frame	0.01
Intermediate Moment Frame	0.02
Special Moment Frame	0.04

을 의미한다.

실험을 통해 항복하중과 변위, 최대하중과 초기강성을 Table 6에 정리하였다. P- δ 및 M- θ 관계를 Fig. 9에 실험 종국상태는 Fig. 10에 정렬하였다.

기본형 F00XX실험는 상·하부에 외다이아프램이 설치되고 기둥-보 플랜지간 용접은 상·하부 모두 생략되었다. 기둥과 외다이아프램간 용접은 외다이아프램의 두께의 1/2만 개선을 하여 부분 용입용접을 실시하였다. 가력이 시작되고 Step-3까지는 외관상으로 변화가 일어나지 않았으며 Step-4에서는 보 플랜지의 겉 표면이 벗겨지면서 비틀림으로 인한 변형이 시작하였다. Step-7(1cycle-0.03rad)에서 양의 가력방향의 최대내력에 도달하였으며 반복가력에 의한 외다이아프램의 휨이 육안으로 관찰되기 시작하였으며 Step-8(1cycle)에서 그 휨이 더욱 증가하였다. 또한 외다이아프램의 Step-8(2cycle-0.04rad)의 음의 가력방향에서 최대내력에 도달하였다. Step-9(1cycle)에서 상부 오른쪽 다이아프램의 강관과 맞닿아 있는 용접부 모서리 끝에서 균열이 발생하였으며 2cycle에서 외다이아프램의 대각선 방향으로 파단이 발생하며 최종적인 파괴에 이르렀다. F0XX0실험 경우 F00XX실험체와 달리 하부 외다이아프램을 설치하지 않

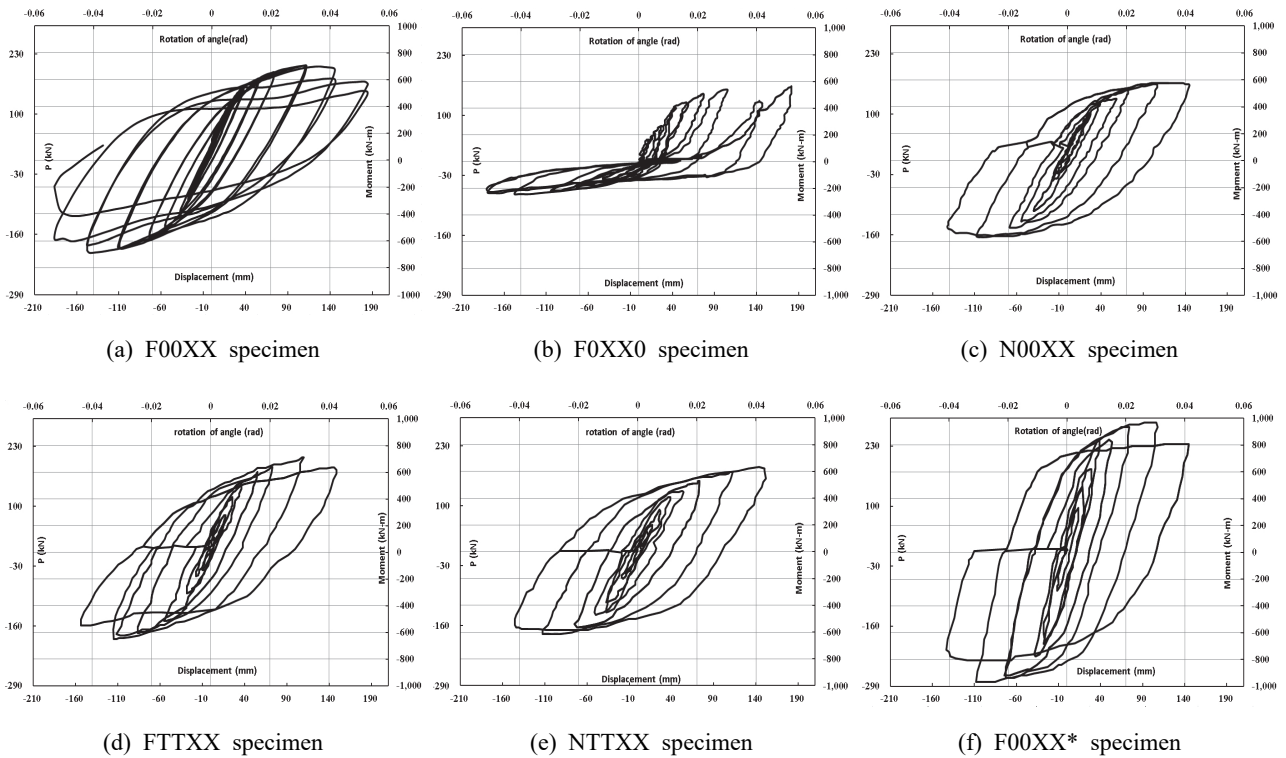


Fig. 9. Load-displacement curve and Moment-rotation of angle relationship

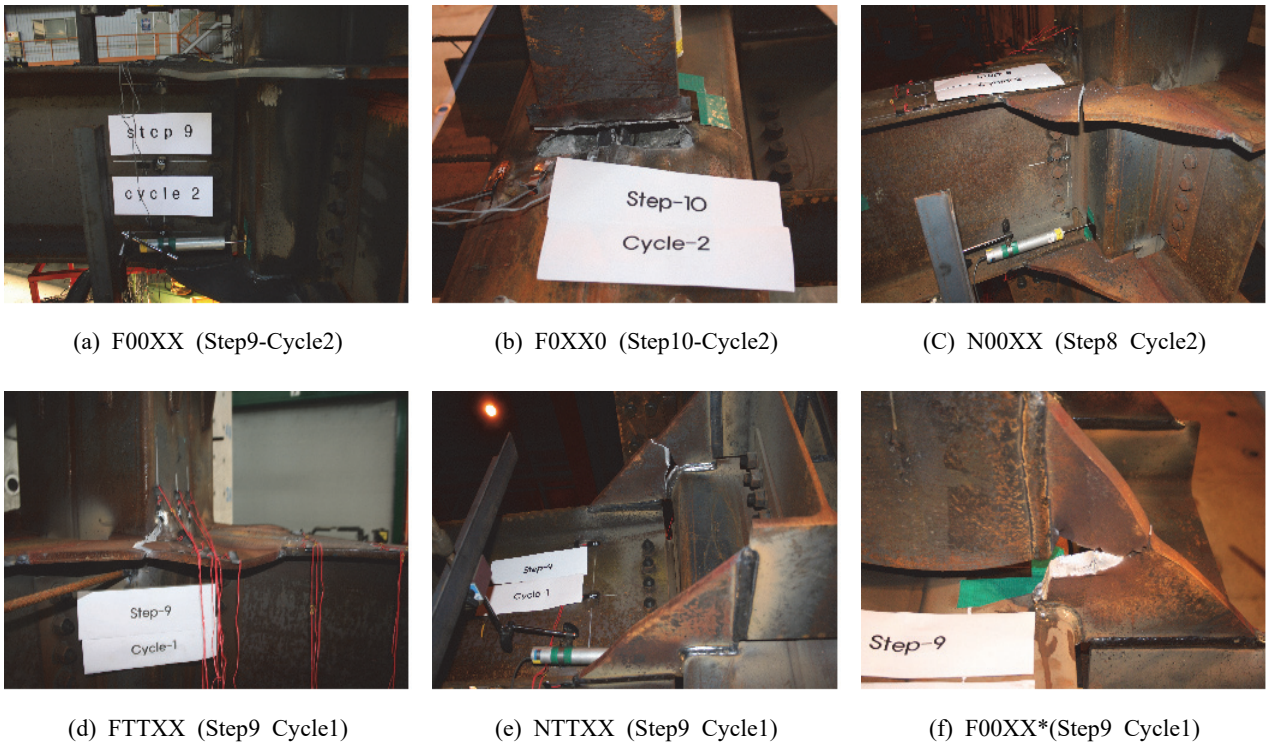


Fig. 10. Failure mode

며 하부 플랜지를 통하여 강관면에 압축력이 가해질 시 접합부의 구조성능을 알아보기 위한 실험체이다. 하부는 외다이아프램이 없는 관계로 보 플랜지를 강관 면에 직접 용접한 충전 실험체로 부모멘트시 Step-3(6cycle-0.0075rad)까지는 탄성적인 거동을 보였고 그 이후로는 탄소성 거동을 보이면서 내력이 상승하였다. 정모멘트 가력시 Step-7(1cycle-0.03rad)에서 하부 플랜지 용접부 끝단에서 강관면이 파단을 시작하였고 Step-8(2cycle-0.04rad)에서 강관면이 5cm 가량 파단되었으며 상부 외다이아프램은 약간의 휨 변형을 보였다. 실험체는 같은 내력을 유지하며 거동하다가 Step-10(2cycle)에서 하부 플랜지와 맞닿아 있는 강관면이 콘크리트 속에 묻혀있는 앵커와 분리되면서 최종적인 파괴에 도달하였다.

N00XX는 비충전 실험체로 F00XX와 콘크리트 충전 유/무 변수에 따른 구조성능을 비교하기 위해서 제작되었다. 가력시 실험체는 Step-3(0.0075rad)까지는 탄성거동을 보이다 Step-7(2cycle)에서 상·하부 다이아프램의 휨이 육안으로 관찰되었으며 반복된 휨에 따른 파괴가 Step-8(2cycle)에서 상부 오른쪽 다이아프램의 파단으로 종국상태에 도달되었다.

FTTXX는 기둥-보 접합부가 건물의 외곽부에 위치할 때

적용되는 한쪽 외다이아프램이 존재하지 않는 비대칭 접합부의 구조 성능을 평가하기 위하여 제작되었다. 가력시 전체적으로 상당히 안정적인 이력곡선을 보여주고 있으며 Step-4(0.01rad)이후로 탄소성 거동을 보이고 있지만 강성은 크게 떨어지지 않은 채로 내력은 계속 상승하였다. Step-7(2cycle)에서 보 플랜지의 비틀림과 더불어 외다이아프램의 과도한 휨이 발생하였다. Step-8(2cycle)에서 최대내력에 도달하였으며 Step-9(1cycle)에서 강관과 외다이아프램이 만나는 용접부에서 시작된 균열이 외다이아프램을 파단시킴과 동시에 강관면의 파단이 유도되었다.

NTTXX는 콘크리트가 충전되지 않아 비교적 낮은 강성을 나타냈다. Step-5부터 탄소성 구간으로 접어들었으며 최대 내력은 양방향 가력시에는 Step8에서, 음방향 가력시에는 Step-7에서 결정되었다. Step-7(2cycle)에서 외다이아프램의 휨이 크게 발생하였으며 Step-8에서 오른쪽 외다이아프램과 강관면이 만나는 용접부 끝에서 균열이 육안으로 관찰되었으며 Step-9(1cycle)에서 오른쪽 다이아프램이 파단되며 실험이 종료되었다.

F00XX*는 타 실험체와 달리 강관의 두께와 보 크기가 확대된 경우이다. 반복가력시 Step-4 까지 탄성거동을 보였으며 최대내력은 양, 음 방향 모두 Step-7(2cycle-0.03rad)에

서 나타났다. Step-7에서 반복가력에 따른 외다이아프램의 휨이 보 플랜지의 비틀림을 유발하고 Step-8(1cycle)에서 보플랜지와 하부 외다이아프램이 만나는 경계선에서 양쪽 외다이아프램 모두 균열이 발생하였고 Step-9(1cycle)에서 다이아프램의 완전 파단 및 전단탑 용접부가 파단 됨으로써 실험이 종료되었다.

3. 분석 및 고찰

3.1 초기강성

각 실험체의 초기강성 값을 각 부/정 모멘트 구간으로 나누어 Fig. 11에 나타났다. 좌우 비대칭 상세를 갖는 F0XX0의 경우 하부에만 용접하여 상대적으로 정모멘트였을 때 초기강성이 약 1.37배 높게 평가되었다. 이를 제외하고는 상하부의 초기강성은 비교적 유사하게 평가되었다. 충전유무에 따라 비교할 때 (F00XX Vs N00XX, FTTXX Vs NTTXX) 내부에 콘크리트가 충전이 되었을 경우 초기강성 값이 약 1.35배 소폭 상승함을 알 수 있다. 이는 기둥-보 접합부의 반복가력시 내부에 존재하는 리브는 콘크리트와의 합성효과에 기인한 것으로 판단된다. 또한 T자형 접합부인 FTTXX, NTTXX의 경우 반대편 외다이아프램의 존재하지 않음에도 초기 강성값은 기본형 (F00XX) 실험체와 큰 차이를 보이지 않았다. 마지막으로 F00XX* 실험체의 경우 보 플랜지와 다이아프램 폭 두께 증가로 인한 초기강성 값이 기본형(F00XX) 실험체의 2배 이상으로 크게 나타났다.

3.2 최대내력

각 실험체의 최대내력을 비교하기 위하여 Fig. 12와 같이 반복가력 실험 결과를 단조가력 실험 결과의 형상곡선으로 근사화 하여 하중-변위 관계로 나타낸 것이다.

F00XX와 FTTXX은 162kN, 180kN은 무충전인 N00XX와 NTTXX의 136.3kN, 150.4kN에 비하여 20kN가량 상승하였다. 하부에 다이아프램이 설치되지 않은 F0XX0도 하방향 가력시 보플랜지가 강관면에 가하는 압축력을 내부 콘크리트가 저항하기 때문에 상하동형 실험체의 결과와 비슷한 156.9kN의 내력을 발휘하였다. 강관의 두께를 9mm, 보 크기를 588×300×12×20, 외다이아프램 폭을 100mm로 증가시킨 F00XX*은 256.1kN의 최대내력을 나타내었다.

3.3 접합부 내진 성능 요구치

기둥-보 접합부는 지진시 발생하는 큰 전단력과 에너지를 흡수할 수 있도록 일정한 소성변형능력이 확보되어야 한다. Table 6은 골조별 내진성능 요구 값(AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings)^[9]을 보여주고 있다. 여기에서 SMF접합부는 지진하중 작용시 큰 비탄성 변형에 견딜 것으로 기대되는 system으로서 0.04radian (inelastic 0.01+elastic0.03)이상의 층간 변위각을 확보하며 휨강도는 층간변위각 0.04radian에서 접합부 공칭 모멘트의 80%이상으로 한다. 기둥-보 접합부의 접합부 내진 성능을 알아보기 위하여 0.04rad 이후의 모멘트 회전각 곡선만을 다음 Fig. 13에 표시하였다. 결과 실험체 F00XX*이 다소 불안정한 이력을 나타내고는 있지만 공칭 소성모멘트가 가까운 충분한 내력 및 연성을 발휘하며 나머지 실험체 또한 0.04rad이상의 소성변형능력을 확보함에 따라 본 연구에서 소개된 기둥-보 접합부는 강진지역에 사용되는 SMF접합부로서의 사용이 가능한 것으로 판단된다.

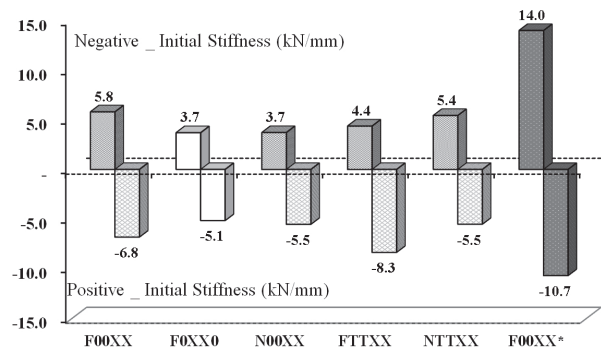


Fig. 11. Comparison of initial stiffness each specimens

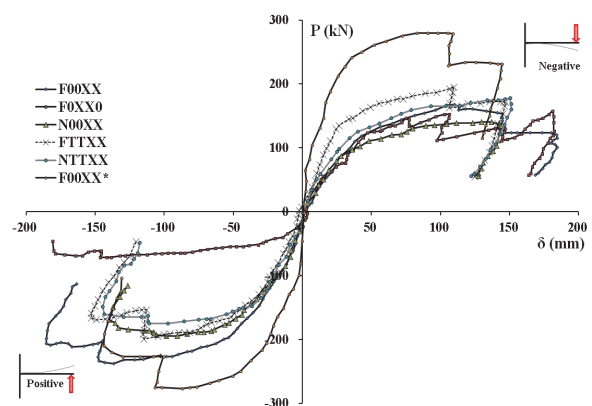


Fig. 12. Skelton curve of specimens

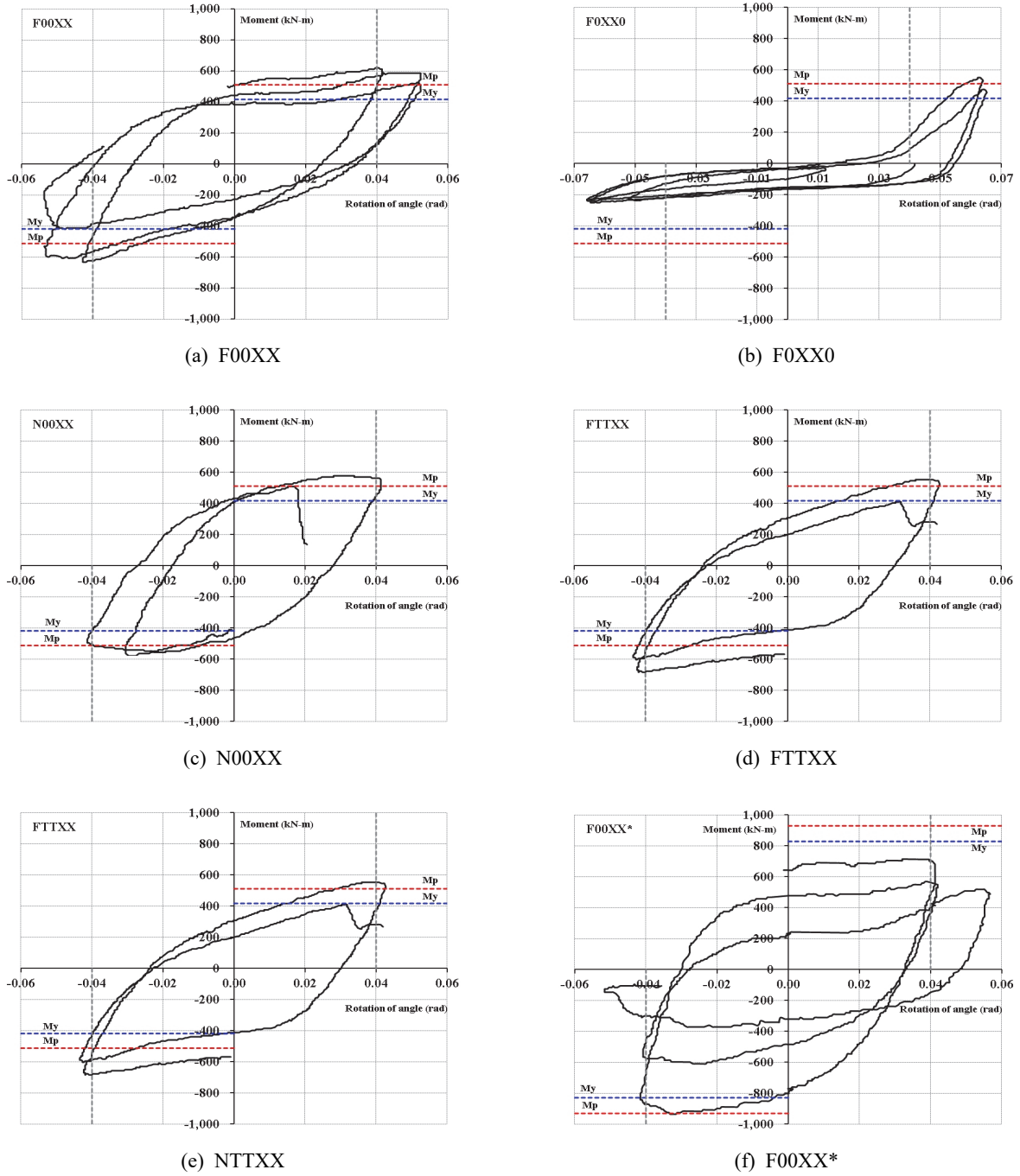


Fig. 13. Inelastic rotation of angle since then 0.04rad

3.4 에너지 소산능력

실험체에서 하중 단계별 에너지 소산능력을 Fig. 14에 정리하였다. F00XX*의 경우 약 1%변위각 이후부터 에너지 소산이 급격히 증가하였으며 상부 기둥면에 용접을 배제한 F0XX0의 경우 회전각은 5%이상 연성적으로 보여지지만 에너지 흡수능력이 상대적으로 가장 떨어지는 것으로 평가되

고 있다. 보에서 발생된 회전각이므로 기둥 내 콘크리트 층 전유무에 대한 차이는 미비한 것으로 평가되었다.

3.5 내력식과 비교 검증

앞서 1장에서는 외다이아그램 내력식에 대한 분석이 이뤄졌다. 본 실험에서 나온 결과를 식 (3), (4), (5)와 검토하여

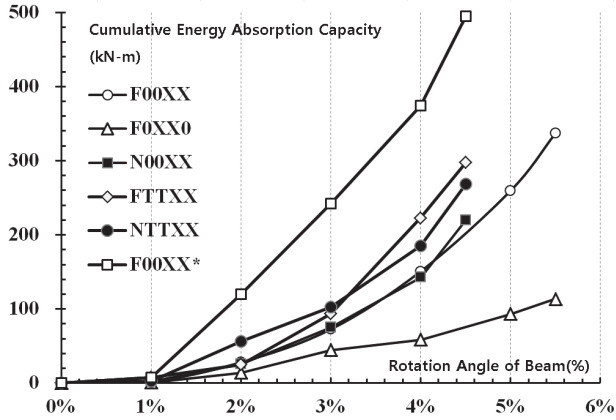


Fig. 14. Energy dissipation capability each cycle

Table 7. Verification of test results versus strength formula

Specimen	Pu(kN)	Pa (kN)			Pa / Pu(+)		
	+	Eq3	Eg4	Eq5	Eq3	Eg4	Eq5
F00XX	162	246	194	-	1.52	1.20	-
N00XX	136	246	-	208	1.81	-	1.53
FTTXX	180	246	194	-	1.37	1.08	-
NTTXX	150	246	-	208	1.64	-	1.39
F00XX*	256	304	261	-	1.19	1.02	-

외다이아프램의 인장내력식의 적절성을 검증해 보고자 한다. 내력식의 강도는 모두 소재시험에서 측정된 결과를 적용하였다. 기둥 내 충전일 경우 식 (5)를 대입하였고, 콘크리트 충전되지 않은 실험체는 식 (4)를 적용하여 비교하였다. 비교에 앞서 실험결과를 보면 부, 정 모멘트 결과가 상이하. 즉, 실험체는 좌우 대칭형상을 갖고 있지만 반복가력 실험과정에서 발생하는 추가적인 모멘트에 의해 상하 균등한 내력이 발휘되지 않았다고 보인다. 따라서 이를 감안하여 부모멘트 내력을 기준으로 평가 하였다. Table 7과 같이 상하부 대칭인 접합부 5개에 한해서 각각 설계식과 실험치를 무차원하여 나타내었다. 기둥과 외다이아프램이 모두 고려된 식 (3)의 경우 다소 과대평가 되어 실험보다 약 1.5배 높게 평가하고 있다. 반면 모든 인장력을 외다이아프램에서 저항하도록 가정한 식 (4), (5)의 경우 실험결과와 약 1.25배 차를 보이며 비교적 실험결과치에 근접하게 예측되었다.

4. 결론

외다이아프램을 갖는 기둥-보 접합부의 내진성능을 평가

하기 위해 실시되었다. 총 6개의 반복가력 실험결과에 따른 비교·분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 얇은 강판으로 제작된 각형기둥과 외다이아프램의 접합으로 이루어진 접합부의 반복가력 실험결과 하부에 외다이아프램이 설치되지 않은 실험체를 제외한 상하동형 실험체 모두 보 플랜지의 공칭 전소성 모멘트 이상의 내력을 발휘하였다.
- (2) 보의 횡좌굴 발생으로 인하여 양쪽 다이아프램의 변형이 동일하지 않았지만 다이아프램이 파단된 Step9의 층간변위각 0.05rad의 가력 시점에서 기둥의 변형은 발생하지 않았으며 그에 따라 지진하중에 대하여 발생하는 접합부의 변형은 대부분 외다이아프램이 흡수하는 것으로 나타났다. 따라서 기둥-보 접합부는 다이아프램의 변형에 따른 내력발휘로 보의 공칭전소성모멘트 이상의 충분한 내력을 발휘하는 것으로 나타났다.
- (3) F0XX0 실험체를 제외한 나머지 실험체 모두 반복가력시 안정적인 탄소성 거동을 보였으며 강진지역에서 사용가능한 SMF접합부의 층간 변위각 기준인 0.04rad를 만족하는 것으로 나타나 본 연구에서 수행된 접합부는 충분한 연성능력을 확보한 것으로 판단된다.
- (4) 기둥에 대하여 3방향에서 보가 접합되는 T형 FTTXX, NTTXX 실험체 모두 4방향 다이아프램과 동일한 구조 성능을 나타내었으므로 본 연구에서 제시된 접합상세를 이용할 경우 충분한 접합부 내력과 내진성능을 발휘할 것으로 판단된다.
- (5) 기존 단순인장 실험체와 기둥-보 접합부 실험체에 대하여 동일한 다이아프램 폭(h_s)를 이용하여 구조실험을 수행하였으나 최종파괴 형태는 단순인장실험에서는 보 플랜지 파괴로 나타난 반면 보-기둥 접합부에서는 다이아프램 파괴로 나타났다.
- (6) 외다이아프램의 인장내력식의 적절성을 실험결과와 비교 검토하였다. 기둥과 외다이아프램이 모두 응력배분된다고 가정된 경우 실험치에 비해 약 1.5배 과대평가되며, 외다이아프램에서만 응력흐름이 유도된 경우 실험결과에 비해 약 1.25배로 비교적 근접하게 예측되었다. 하지만, 외다이아프램의 좌굴 또는 보의 비틀림에 의해 발생하는 접합부 전체 내력에 대한 영향에 대해서는 고려되지 않았으므로 이에 대한 추가적인 연구가 보완 되어야 한다.

참고문헌(References)

- [1] 김선희, 방중석, 박영욱, 최성모(2012) 합성반강접 CFT기둥-보 접합부 구조의 경제성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.109-117.
Kim, S.H., Bang, J.S., Park, Y.W., and Choi, S.M. (2012) The Structural Economical Efficiency Evaluation of Partially Restrained Composite CFT Column-to-Beam Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.109-117 (in Korean).
- [2] 박민수, 김희동, 이명재(2011) 충전성을 개선한 원형 CFT 구조의 기둥-보 접합부 구조적 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제6호, pp.737-745.
Park, M.S., Kim, H.D., and Lee, M.J. (2011) Structural Behavior of Beam-to-Column Connection of Circular CFT Structural Improving Concrete Filling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No. 6 pp.737-745 (in Korean).
- [3] 김선희, 염경수, 최성모(2013) 내부 앵커형 콘크리트 충전 기둥의 내력 및 변형 능력에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.347-357.
Kim, S.H., Yom, K.S., and Choi, S.M. (2013) A Study on the Load Carrying Capacity and Deformation Capacity of the Internal Anchors Welded Cold Formed Concrete Filled Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.347-357 (in Korean).
- [4] 이성희, 정현모, 김대중, 김진호, 최성모(2008) 용접조립 각형CFT기둥-보 외다이아프램 접합부의 구조특성, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제6호, pp.711-722.
Lee, S.H., Jung, H.M., Kim, D.J., Kim, J.H., and Choi, S.M. (2008) Structural Characteristic Welded Built-up Square CFT Column to Beam Connection with External Diaphragm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.6, pp.711-722 (in Korean).
- [5] 日本建築学会(1997) コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 日本建築学会, 日本.
Architectural Institute of Japan (1997) *Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [6] 日本建築学会(1994) 鋼管構造の舉動と設計に関する最近の究, 日本建築学会, 日本.
Architectural Institute of Japan (1994) *Recent Research for Behavior and Design of Tubular Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [7] Matsui, C. (1985) Strength and Behavior of Frames with Concrete Filled Square Steel Tubular Columns Under Earthquake Loading, *Proceedings of the International Specialty Conference on Concrete Filled Tubular Structures*, China, pp.104-111.
- [8] 박제한(2008) 용접조립 각형 CFT기둥-보 외다이아프램 접합부의 구조특성에 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대.
Park, J.H. (2008) *A Study on Structural Characteristics of Welded Built-up Square CFT Column to Beam Connection with External Diaphragm*, Master's Thesis, University of Seoul, Korea (in Korean).
- [9] American Institute of Steel Construction (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-10), USA.
- [10] 국가기술표준원(2003) 금속 재료 인장 시험 방법(KS B 0802: 2003).
Korean Agency for Technology and Standards (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).
- [11] 오현근, 김선희, 최성모(2013) 상하 이형 다이아프램으로 보강된 2심 냉간성형 각형 CFT기둥-보 접합부의 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제1호, pp.35-45.
Oh, H.K., Kim, S.H., and Choi, S.M. (2013) Experimental Study on Two-Seam Cold Formed Square CFT Column to Beam Connections with Asymmetric Diaphragms, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.1, pp.35-45 (in Korean).
- [12] Choi, S.-M., Sang, Y.-S., and Kim, J.H. (2006) Experimental Study on Seismic Performance of Concrete Filled Tubular Square Column-to-Beam Connections with Combined Cross Diaphragm, *Steel & Composite Structure*, Techno-Press, Vol.6, No.4, pp.303-317.
- [13] Fujimoto, T., Mukai, A., Nishiyama, I., and Sakino, K. (2004) Behavior of Eccentrically Loaded Concrete-Filled Steel Tubular Columns, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.130, No.2, pp.203-212.
- [14] Gourley, B.C., and Hajjar, J.F. (1994) *Cyclic Nonlinear Analysis of Three-Dimensional Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns and Composite Frames*, Structural Engineering Report No. ST-94-3, Institute of Technology (University of Minnesota), USA.
- [15] Teh, L.H., and Rasmussen, K.J.R. (2007) Strength of Arc-Welded T-Joints Between Equal Width Cold-Formed RHS, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier,

Vol.63, No.4, pp.571-579.

- [16] Bradford, M.A., Loh, H.Y., and Uy, B. (2002) Slenderness Limits for Filled Circular Steel Tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.58, No.2, pp. 243-252.
- [17] Mursi, M., and Uy, B. (2004) Strength of Slender Concrete Filled High Strength Steel Box Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.60, No. 12, pp.1825-1848.

기 호(Notation)

B : 각형강관의 외경(cm)

b_f : 보플랜지의 폭(cm)
 h_s : 다이아프램의 치수(cm)
 F_{ct} : 각형강관의 허용인장응력도(tf/cm²) ($F_{ct} \leq F_{dt}$)
 F_{dt} : 다이아프램의 허용인장 응력도(tf/cm²)
 P : 보플랜지의 축방향력(tf)
 P_a : 다이아프램의 단기 허용인장력(tf)
 t : 각형강관의 두께(cm)
 t_f : 보플랜지의 두께(cm)
 t_s : 다이아프램의 판두께(cm)
 Y : 이아프램의 항복비
 (SS 400 : 0.58, SM 490 : 0.64)

요 약 : 콘크리트 충전강관 기둥에 모멘트 접합부를 만들기 위해서는 추가적인 다이아프램 설치가 필요하다. 그 중 내측 다이아프램과 관통 다이아프램을 용접하기 위해서는 기둥강관에 특수한 용접기술이 필요하다. 하지만 이런 기술은 제작업체의 특수장비 보유에 따라서 제작성 저하와 생산단가 상승 유도 등의 문제를 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 외다이아프램을 갖는 실대형 기둥-보 접합부를 제작하였고, 반복가력 실험을 수행하였다. 다이아프램의 용접 유무와 콘크리트 충전 여부, 형상에 따른 총 6개의 T자형 접합부 실험을 통해 내진성능을 평가하였다. 또한 외다이아프램 내력식에 대한 분석이 이뤄졌다. 본 실험에서 나온 결과를 인장내력식의 적절성을 검토 하였다.

핵심용어 : 응력흐름, 외 다이아프램, 반복가력, 모멘트-회전각 관계, 접합상세
