

T-스티프너 보강 콘크리트충전 각형강관 기둥-H형강 보 접합부의 인장거동

Tensile Behavior of CFT Column-to-H beam Connections with External T-shaped Stiffeners

강 창 훈 · 신 경 재 · 오 영 석 · 문 태 섭
Kang, Chang Hoon · Shin, Kyung Jae · Oh, Young Suk · Moon, Tae Sup

ABSTRACT : This paper presents the tensile behavior of a Concrete-Filled Square Steel Tubular (CFT) column to H-beam welded connections. These connections were externally reinforced with T-shaped stiffeners at the junction of CFT column and beam. The tensile loading tests of eighteen tee-joint connections and finite element analysis using ANSYS were carried out. The main parameters of tests are as follows: 1) the thickness of Square Steel Tubular Column : 6 mm, 9 mm, 2) the strength ratios of tensile strength of horizontal stiffeners to tensile strength of beam flange : 70 %, 100 %, 150 %. 3) the strength ratios of shear strength of vertical stiffeners to tensile strength of beam flange : 80 %, 115 %, 160 %. The results of the tests demonstrate that overall behavior and failure modes of all the specimens are governed mainly by the horizontal stiffeners rather than the vertical stiffeners, and the vertical stiffener played only a role in transferring load introduced from beam to column.

핵심용어 : 기둥-보 접합부, 콘크리트충전 각형강관 기둥, T-스티프너, 유한요소해석, 강도비

KEYWORDS : column-to-beam connection, CFT column, T-stiffener, finite element analysis, strength ratio

1. 서론

콘크리트충전 강관(이하 'CFT') 구조는 콘크리트와 강관의 합성작용으로 내력 및 변형능력 등 구조적 우수성이 널리 인지되어 현재, 국내·외에서 활발한 연구와 현장적용이 이루어지고 있다. 그러나, 이러한 구조적 장점에도 불구하고, 건설비용의 많은 부분을 차지하는 기둥-보 접합부상세가 까다롭고 또한 다양하게 개발되어 있지 않다는 문제점을 갖고 있다. 기존의 CFT 기둥-H형강 보 접합부상세로는 일본의 내·외 다이아프램 형식이 있으나⁽¹⁾, 많은 국내·외 연구는 다이아프램을 대체할 수 있는 새로운 접합부 형상의 개발에 노력하고 있다^{(2),(3),(4)}. 이에 필자들은 콘크리트 충전성의 문제로 야기된 시공성의 향상을 위해, 내 다이아프램을 설치하지 않는 새로

운 접합부 개발이 요구되었기에 기존연구를 통해, 기둥을 관통하는 관통요소와 외부에 T-스티프너를 보강한 접합부를 개발하였다⁽⁵⁾. 지진하중 등을 모델링한 반복가력실험결과, 접합부의 전체적인 거동은 관통요소보다는 T-스티프너가 지배하고, T-스티프너의 보강만으로도 보봉괴형의 안정적인 접합부를 구성할 수 있음을 확인하였다⁽⁶⁾. 또한 T-스티프너와 강관의 용접부에서의 취성파괴를 방지할 수 있는 용접상세를 제안하였다⁽⁷⁾. 그러나 선행된 연구에서는 접합부가 다소 안정적으로 설계되어, T-스티프너를 구성하는 수평스티프너와 수직스티프너의 정확한 설계법이나, 접합부의 구조적 거동에 미치는 영향을 상세히 파악하기에 자료가 부족했다. 따라서, 본 연구는 CFT기둥-H형강 보 접합부의 인장측 부분만을 모델링한 인장접합부를 대상으로, 단순인장실험을 통하여 최적의 T-스티프너 용접부상세와 설계방법을 제시하고자 한다.

1) 한양대학교 STRESS 연구 조교수, 공학박사
2) 한남대학교 건축공학과 교수, 공학박사
3) 대전대학교 건축공학과 교수, 공학박사
4) 한양대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

2. 재료 시험

2.1 강재의 인장강도 시험

실험체 제작에 사용된 강재의 역학적 성질을 파악하기 위하여 인장강도시험을 실시한다. 강재의 종류는 각형강관의 경우 SPSR400, 강판의 경우 SS400이다. 인장강도 시험결과는 표 1에 나타내었다.

2.2 콘크리트 압축강도 시험

충전콘크리트는 설계기준강도 210 kgf/cm^2 , 굵은골재 최대치수 25mm, 슬럼프 12cm인 레미콘을 사용하였다. 콘크리트의 탄성계수는 응력도-변형도 곡선에서 최대응력의 1/3에 해당하는 응력에 대한 할선계수(secant modulus)로 하고, 압축강도시험 결과는 표 2에 나타내었다.

3. 실험

3.1 실험체 계획

그림 1과 같이, 강관의 두께 및 수평, 수직스티프너의 치수를 변수로 하는 T-스티프너 보강형 실험체를 계획했다. T-스티프너는 보플랜지에 연결되는 수평스티프너와 기둥플랜지에 연결되는 수직스티프너를 맞댐용접하여 구성되고 보플랜지를 기둥플랜지에 용접한 후, 수평스티프너를 보플랜지와 K형 개선 후 맞댐용접한다. 그리고 T-스티프너 접합부 1차 실험⁽⁵⁾

표 1. 강재 인장강도 시험결과

시험체	σ_y (tf/cm^2)	σ_u (tf/cm^2)	σ_y / σ_u	Elo. (%)
SC6	3.80	4.72	0.81	16.13
SC9	3.56	4.74	0.76	17.75
PL9	3.85	5.41	0.71	20.65
ST9	3.84	5.47	0.70	18.75

SC9 — 두께 또는 직경 (mm)

— 강종 (SC:각형강관, PL:강판, ST: 스티프너)

σ_y : 항복점 σ_u : 인장강도 σ_y / σ_u : 항복비

ϵ_y : 항복변형도 Elo.: 연신율

표 2. 콘크리트 압축강도 시험결과

설계기준강도 (kgf/cm^2)	f_c' (kgf/cm^2)	E_c (kgf/cm^2)	Slump (cm)
210	228.26	2.26×10^5	12

f_c' : 콘크리트 압축강도 E_c : 콘크리트 탄성계수(할선계수)

에서 발생된 일부 실험체의 수직스티프너와 강관 코너부의 취성파괴를 예방하기 위하여, 1차 실험⁽⁵⁾에서는 수직스티프너를 기둥플랜지 평판부 최외단에 위치시키고 K형 개선 후 맞댐용접하였으나, 본 실험에서는 수직스티프너의 외부면을 기둥웨브의 중심선에 위치시키고, 수평스티프너에 스캐럽을 두고 수직스티프너와 강관플랜지를 뒷받침쇠(backing bar)를 이용하여 그림 2와 같이 맞댐용접했다.

실험체 제작에 사용된 기둥부재는 냉간성형 각형강관 $250 \times 250 \times 9$ 를, 보플랜지와 스티프너는 9mm 강판을 사용했다. T-스티프너는 수평스티프너와 사다리꼴형 수직스티프너로 구성되고, 수직스티프너의 짧은 변은 강관과 접합되는 긴 변의 길이를 기준으로 60%이며, 두께는 9mm이다.

실험의 주요변수로는 첫째, 강관의 두께로 6mm와 9mm로 하고, 둘째 수평스티프너의 전단강도(길이)와, 수직스티프너의 인장강도(높이)를 변수로 하여 보플랜지의 인장강도에 대해 각각 70%, 100%, 150%의 강도를 갖도록 계획하였다. 실험체 일람은 표 3에 나타내었고, 표에서 강도비는 실측치와 재료시험값을 이용하여 계산하였다. 실험체 형상 및 치수는 그림 2에 나타내었다.

3.2 가력 및 측정방법

가력은 만능시험기를 이용하여 보플랜지를 양쪽에서 인장력을 가하여 최고내력 이후, 파괴모드가 확인될 때까지 단순인장하는 방법으로 하였다. 변형 측정은 변형 측정장치를 제작하여 사용하였는데, 인장플랜지 사이에 변위가 일어나지 않

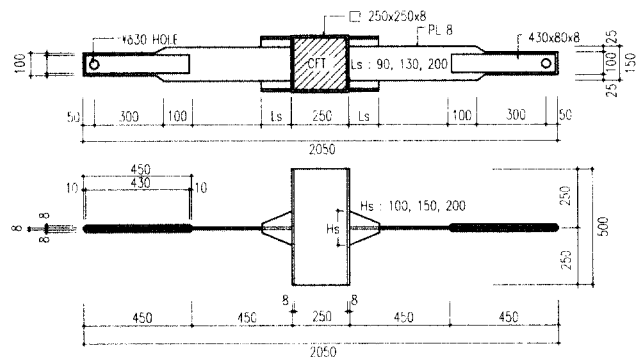


그림 1. 실험체 형상 및 치수

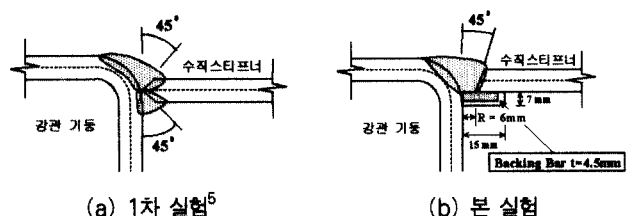


그림 2. 용접부상세

는 지점을 잡아 1150mm의 표점거리 사이에 좌우 2개의 변위계(D.T.)를 설치하여 축방향 변위를 측정하였다. 강관웹과 인장플랜지 및 수직스티프너에 응력분포를 파악하기 위하여 W.S.G.를 부착하여 변형도 분포를 측정하였다.

3.3 실험 결과

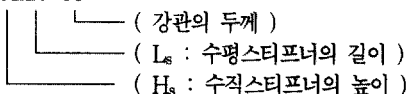
각 실험체의 내력 및 초기강성을 표 3에, 하중-변위관계 곡선을 그림 3에 나타내었다. 표 3에서 항복내력(P_y)은 각 실험체별 하중-변위 관계로부터 초기강성 구배를 갖는 직선과 초기강성 구배의 1/3인 직선을 평행 이동시켜 두 직선의 교점으로 정의한다. 그림 3에서, 종축은 하중을 나타내고, 횡축은 표점거리 1150mm에 대한 축방향 변위를 나타낸다. 실험 결과, 실험체의 파괴모드는 강관웹의 인장파괴, 수평스티프너의 전단파괴, 보플랜지의 인장파괴의 3가지로 결정되었다. 수직스티프너의 외단을 강관웹의 중심선에 일치시킨 용접상태의 변화로, 기존 연구에서 발생하였던 강관의 punching shear⁽¹⁾에 의한 취성파괴를 방지하고, 연성거동이 가능한

표 3. 실험체일람 및 실험결과

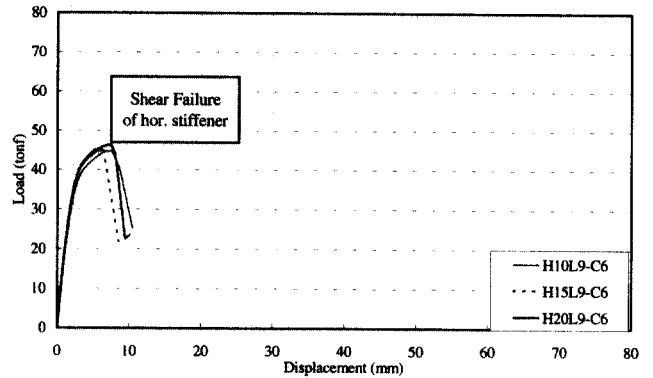
실험체명	H_s (강도비)	L_s (강도비)	P_y (tf)	P_u (tf)	K_i (tf/cm)
H10L9-C6	75%	64%	42.4	44.8	1.8
H15L9-C6	111%	66%	43.0	44.9	1.9
H20L9-C6	145%	67%	44.0	46.4	2.0
H10L13-C6*	73%	99%	53.0	63.2	2.3
H15L13-C6	114%	99%	51.1	67.0	2.3
H20L13-C6	151%	97%	52.5	67.1	2.3
H10L20-C6	78%	157%	56.4	70.6	2.6
H15L20-C6	115%	154%	53.8	71.0	2.6
H20L20-C6	153%	155%	54.0	70.9	2.7
H7L9-C9	76%	69%	48.6	55.1	2.0
H10L9-C9	111%	67%	48.1	53.8	2.1
H15L9-C9	165%	67%	49.5	56.9	2.2
H7L13-C9*	80%	99%	52.7	64.1	2.3
H10L13-C9	113%	99%	51.0	69.0	2.4
H15L13-C9	168%	100%	52.1	69.0	2.5
H7L20-C9	76%	158%	58.5	70.5	2.6
H10L20-C9	113%	157%	54.0	71.0	2.7
H15L20-C9	168%	154%	54.0	70.4	2.7

* : 보플랜지의 측정용 bolt-hole에서 파단된 실험체

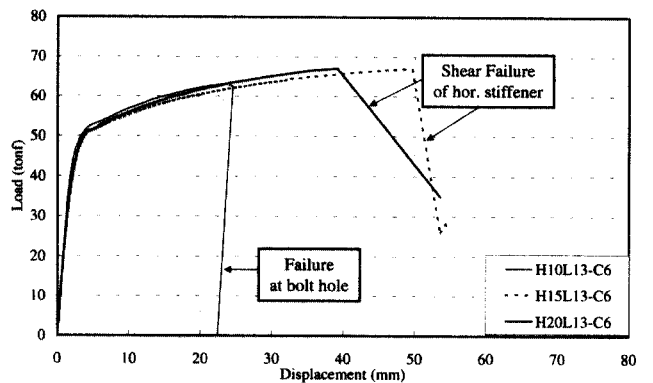
H15L20-C9



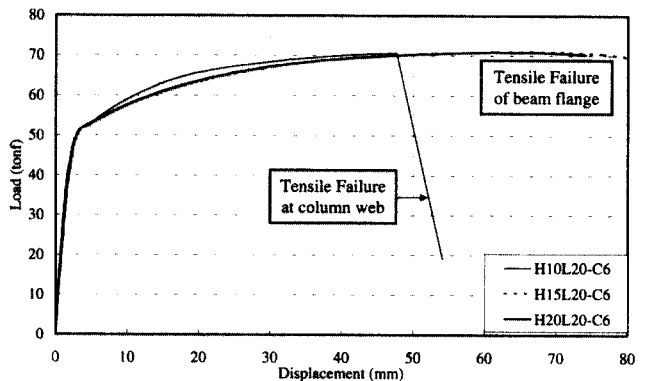
P_y : 항복내력, P_u : 최대내력, K_i : 초기강성



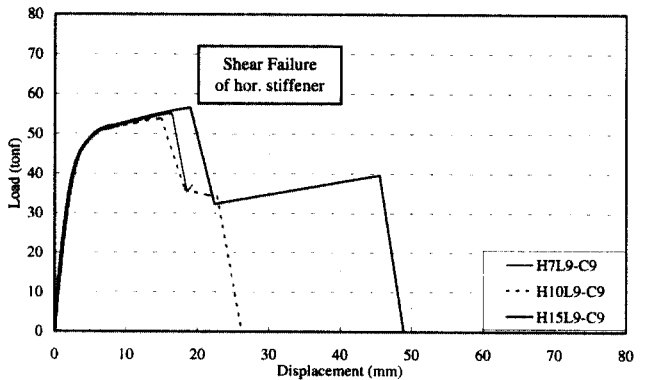
(a) L9-C6 계열



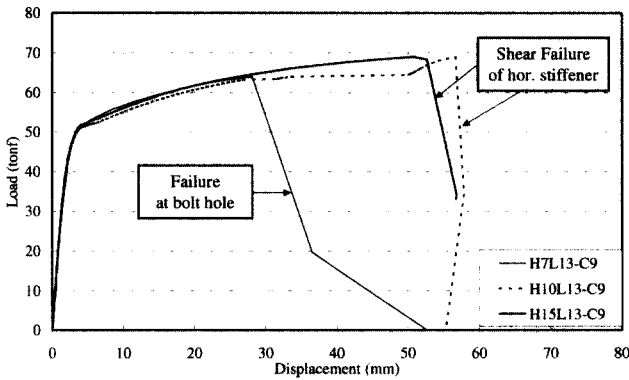
(b) L13-C6 계열



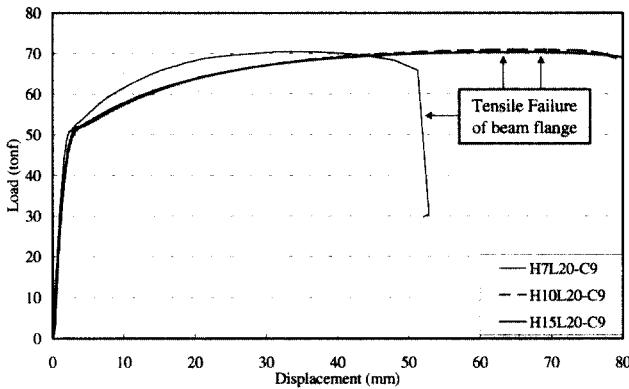
(c) L20-C6 계열



(d) L9-C9 계열



(e) L13-C9 계열



(f) L20-C9 계열

그림 3. 하중-변위관계 곡선

강관웨브의 인장파괴가 유도되었다. 처음 실시된 H10L13-C6, H7L13-C9 실험체는 변위측정장치를 고정시키기 위해 보플랜지에 천공한 bolt-hole에서 파단되어, 이후의 실험체는 변형이 없는 보플랜지 단부에 천공하지 않고 용접하여 변위측정장치를 고정시켰다.

4. 분석 및 고찰

4.1 변형분포 및 하중전달기구

실험체 부착된 W.S.G.로부터 입력된 변형도를 분석하여, 강관 두께에 따른 하중전달기구를 규명한다.

4.1.1. 6mm 강관

항복내력시, 수평스티프너의 길이가 보플랜지에 대한 강도비 70%인 90mm 실험체는, 수직스티프너의 높이에 관계없이 보플랜지, 강관의 웨브, 그리고 수직스티프너가 모두 탄성상태에 있다. 그러나, 수평스티프너의 길이가 보플랜지에 대한 강도비 100%인 130mm와 150%인 200 mm 실험체는,

수직스티프너의 높이에 관계없이 보플랜지가 모두 보플랜지의 항복변형도를 상회하였다. 또한 H10L13-C6 실험체는 강관의 웨브가 항복변형도에 도달하였고, H10L20-C6 실험체의 강관웨브 또한 항복변형도에 근접하고 있으나, 수직스티프너는 모두 탄성상태에 머무르고 있다.

최대내력시, 수평스티프너의 길이가 90mm인 실험체는, 수직스티프너의 높이에 관계없이 보플랜지, 강관의 웨브, 그리고 수직스티프너 모두가 탄성상태에 있다. 그러나, 수평스티프너의 길이가 130mm와 200mm의 실험체의 경우, 수직스티프너의 높이에 관계없이 보플랜지가 모두 항복변형도를 상회하고, H10L13-C6, H10L20-C6, H15L13-C6, 그리고 H15L20-C6 실험체는 강관의 웨브가 항복변형도를 상회하고 있다.

하중전달기구를 살펴보면, 수직스티프너의 높이에 관계없이 수평스티프너의 길이가 90mm인 실험체는 보플랜지, 스티프너나, 강관웨브의 변형보다는 기둥 강관플랜지의 면외변형이 지배적이고, 강관의 면외변형에 의한 수평스티프너의 전단변형으로 유발되는 전단력으로 저항하다가 수평스티프너와 보플랜지 용접부에서 급격히 취성파괴 되었다. 따라서, 수평스티프너의 길이가 90mm인 실험체는 수평스티프너와 보플랜지 용접부의 내력으로 최대내력이 결정되었다. 수직스티프너의 높이에 관계없이 수평스티프너의 길이가 보플랜지에 대한 강도비 100%인 130mm의 실험체는 강관 기둥플랜지의 면외변형에 의한 수평스티프너의 전단변형과 보플랜지의 인장변형이 함께 발생하였다. 실험체의 전체적인 거동은 보플랜지가 지배하여, 항복내력은 보플랜지의 인장항복내력과 정확히 일치하고, 항복이후의 거동 또한 보플랜지가 지배한다. 보플랜지의 변형과 함께 강관의 면외변형이 점차 증가하여, 강관 기둥 플랜지의 면외변형에 의한 수평스티프너의 전단변형량이 수평스티프너 길이 90mm인 실험체의 변형량과 같게 되는 시점(강관의 면외변형량 4.5 - 5.5mm)에서, 수평스티프너와 보플랜지 용접부의 파단에 의해 약 67ton에서 최대내력이 결정되었다. 단, H10L13-C6 실험체는 변위측정장치의 고정을 위해 천공한 bolt hole에서 63.21ton에서 파단이 발생하였다. 수평스티프너의 길이가 200mm인 실험체는 보플랜지가 인장거동을 지배하여 인장강도 시험편과 유사한 거동을 나타내었다. 단, 강관의 웨브에서 인장파단이 발생한 H10L20-C6 실험체를 제외하면, 최종파괴 또한 보플랜지의 인장파괴로 나타났다. H10L20-C6 실험체는 비록 수직스티프너의 높이가 보플랜지에 대한 강도비로 78%이지만, 전체적인 거동은 보플랜지의 인장거동과 유사하고, 최대내력 또한 보플랜지 강도의 97% 정도로 수직스티프너의 길이가 200 mm인 다른 실험체와 거의 일치한다. 따라서 수직스티프너의 높이는 보플

랜지에 대한 강도비로 80% 정도 확보되면, 보플랜지로부터 도입되는 인장력을 거의 대부분(97%정도) 강관기둥에 전달할 수 있을 것으로 판단된다.

4.1.2. 9mm 강관

항복내력시의 변형분포는 강관 6mm 실험체와 유사하게, 수평스티프너의 길이가 보플랜지에 대한 강도비 70%인 90mm의 실험체는, 수직스티프너의 높이에 관계없이 보플랜지, 강관의 웹, 그리고 수직스티프너가 모두 탄성상태에 있다. 수평스티프너의 길이 130mm, 200mm인 실험체의 경우, 수직스티프너의 높이에 관계없이 보플랜지가 모두 보플랜지의 항복변형도를 상회하고 있으나, 강관 두께의 증가로 강관웹과 수직스티프너는 여전히 탄성상태에 머물고 있다.

최대내력시의 변형분포는 수직스티프너의 높이에 수평스티프너의 길이에 관계없이, 모든 실험체가 보플랜지의 항복변형도를 상회하나, 강관의 웹은 여전히 탄성상태에 머물고 있다. 그 중 H7L13-C9 실험체는 수직스티프너가 항복변형도에 도달하였고, H7L20-C9 실험체는 수직스티프너가 항복변형도를 상회하고 있다.

하중전달기구를 살펴보면, 수직스티프너의 높이에 관계없이 수평스티프너의 길이가 보플랜지에 대한 강도비 70%인 90mm의 실험체는, 강관 6mm이고 수평스티프너가 강도비 100%인 130mm 실험체와 유사하게 강관기둥 플랜지의 면외변형에 의한 수평스티프너의 전단변형과 보플랜지의 인장변형이 함께 발생하였다. 실험체의 전체적인 거동은 보플랜지가 지배하여, 항복내력은 보플랜지의 인장항복내력과 정확히 일치하고, 항복이후의 거동 또한 보플랜지가 지배한다. 보플랜지의 변형과 함께 강관의 면외변형이 점차 증가하여, 강관기둥 플랜지의 면외변형에 의한 수평스티프너의 전단변형량이 수평스티프너 길이 90mm인 실험체의 변형량과 같게 되는 시점(강관의 면외변형량 4.5 - 5.5mm)에서, 수평스티프너와 보플랜지 용접부의 파단에 의해 약 55 ton에서 최대내력이 결정되었다. 90mm 실험체의 항복내력은 보플랜지의 항복내력의 95% 정도이나, 최대내력은 보플랜지의 인장최대내력의 75% 정도이다. 이러한 내력과 파괴모드의 차이는 다음과 같은 이유로 설명할 수 있다. 강관기둥 플랜지의 면외 저항력이 보플랜지의 항복을 유발할 수 있을 만큼 충분히 커서 강관의 면외변형과 함께 보플랜지의 항복을 유발한다. 하중의 증가와 함께 강관의 면외변형량이 점차 증가하여, 강관기둥 플랜지의 면외변형에 의한 수평스티프너의 전단변형량이 강관 6mm 그리고 수평스티프너 길이 90mm와 130mm인 실험체와 동일한 시점(강관의 면외변형량 4.5 - 5.5mm)에서 수평스티프너와 보플랜지 용접부가 파단되었다. 수직스티프너의

높이에 관계없이 수평스티프너가 보플랜지에 대한 강도비 100%인 130mm의 실험체도 90mm의 실험체와 마찬가지로 강관기둥 플랜지의 면외변형과 보플랜지의 인장변형이 함께 발생하였다. 실험체의 전체적인 거동은 보플랜지가 지배하여, 항복내력은 보플랜지 항복내력의 100%이고 최대내력도 거의 97%이다. 수평스티프너의 길이가 200mm인 실험체는 보플랜지가 인장거동을 지배하여 인장강도시험편과 유사한 거동을 나타내었고, 최종적으로 보플랜지의 파단에 의해 내력이 결정되었다.

강관 두께의 증가는 수평스티프너가 보플랜지 강도의 70%인 실험체에서 변형능력과 내력의 증가를 유발하지만, 그 이상의 실험체에는 영향이 없는 것으로 나타났다.

따라서 수평스티프너의 길이를 보플랜지에 대한 강도비로 100% 정도 확보하면, 비록 수평스티프너가 최종적으로 파단되지만, 보플랜지로부터 도입되는 인장력의 거의 대부분(6mm 강관의 경우, 항복내력은 100%, 최대내력은 92% 이상, 그리고 9mm 강관의 경우, 항복내력은 100%, 최대내력은 97% 이상)을 강관기둥에 전달할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 초기강성

강관 두께와 수평스티프너의 길이가 동일한 경우, 수직스티프너의 높이가 증가하더라도, 강성의 증가는 0% ~ 10%의 분포로 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 수직스티프너의 강성에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

수평스티프너의 길이와 수직스티프너의 높이가 보플랜지에 대한 강도비로 환산하여 동일한 경우, 강관 두께의 증가에 의한 강성의 증가는 L90계열에서 11%~13%, L130계열에서 2%~11%, L200계열에서 0%~3%의 분포로 나타났다. 따라서, 강관 두께의 증가에 의한 강성의 증가는 수평스티프너가 보플랜지의 강도비로 70%인 90mm의 실험체에서 평균 12%이고, 수평스티프너가 보플랜지의 강도비로 100%이상인 실험체에서는 거의 없는 것으로 판단된다.

수직스티프너의 높이가 동일한 경우, L90계열에 대한 L130계열의 강성 증가는 강관 두께 6mm 실험체에서, 평균적으로 20%이고 강관 두께 9mm 실험체에서, 14%이다. 그리고 L90계열에 대한 L200계열의 강성 증가는 강관 두께 6mm 실험체에서, 40%이고 강관 두께 9mm 실험체에서, 28%이다. 따라서, 수평스티프너의 길이가 강성에 미치는 영향이 변수들 중 가장 큰 것으로 판단된다.

본 접합부의 강성도를 평가하기 위하여, 그림 4와 같이 표점거리 사이를 보플랜지로 가정하여 구한 보플랜지 인장강성에 대한 실험체의 비를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이,

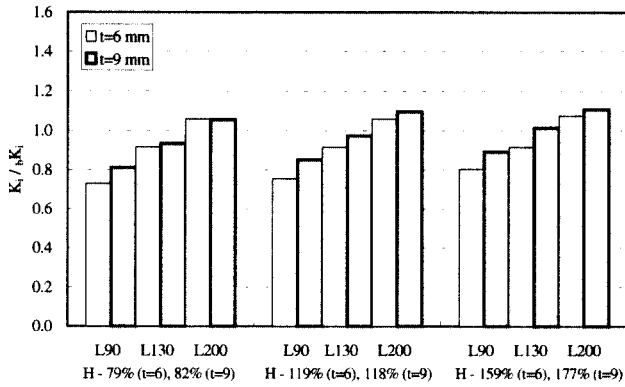


그림 4. 초기강성

L200계열 실험체는 강관 두께와 수평스티프너의 높이에 관계없이 모두 보플랜지의 강성을 상회하고 있다. L130계열의 경우, 강관 두께 6mm 실험체는 수직스티프너의 높이에 관계없이, 92%의 강성도를 나타내고 있으나, 강관 두께 9mm 실험체의 강성도는 수직스티프너의 높이가 보플랜지의 강도비로 80%일 때, 93%이고, 118%일 때, 97%이고 강도비로 177%일 때, 101%로 보플랜지의 강성에 근접하고 있다. 이러한 차이는 앞서 설명한 바와 같이, 강관 두께의 증가에 의한 강관플랜지의 면외변형 강성 증가에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 수평스티프너는 보플랜지에 강도비로 100%, 그리고 수직스티프너는 73%이상으로 설계되면, 보플랜지 강성의 90%이상을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 항복 및 최대내력

강관 두께와 수평스티프너의 길이가 동일한 경우, 수직스티프너의 높이가 증가하더라도, 항복내력과 최대내력의 증가는 거의 없는 것으로 나타났고 수직스티프너의 역할은 단지 수평스티프너로부터 도입되는 하중을 강관에 전달하는 것으로 파악된다. 수직스티프너의 높이가 보플랜지에 대한 강도비가 78%인 H10L20-C6 실험체는 비록 강관의 웹에서 인장파괴가 발생하였지만, 최대내력은 보플랜지의 파단으로 내력이 결정된 실험체의 100% 수준이다. 따라서 수직스티프너 높이는 보플랜지에 대한 강도비 80%정도로 설계되면, 보플랜지의 최대내력에 근접한 내력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

수평스티프너의 길이와 수직스티프너의 높이가 보플랜지에 대한 강도비로 환산하여 동일한 경우, 강관 두께의 증가에 의한 내력의 증가는 L90계열에서 평균적으로 항복내력 13%, 최대내력 21%이다. 그리고 수평스티프너가 보플랜지의 강도비로 100%이상인 L130과 L200계열에서 항복내력과 최대내력의 증가는 거의 없는 것으로 나타났다.

수직스티프너의 높이가 동일한 경우, L90계열에 대한 L130계열의 내력 증가는 강관 두께 6mm 실험체에서, 평균적으로 항복내력 21%, 최대내력 45%이고 강관 두께 9mm 실험체에서, 항복내력 7%, 최대내력 22%이다. 그리고 L90계열에 대한 L200계열의 내력 증가는 강관 두께 6mm 실험체에서, 항복내력 27%, 최대내력 56%이고 강관 두께 9mm 실험체에서, 항복내력 14%, 최대내력 28%이다. 그러나, L130계열에 대한 L200계열의 내력증가는 미미한 것으로 나타났다.

보봉괴형의 접합부 설계를 위한 각 변수의 한계치를 조사하기 위하여, 그림 5와 그림 6과 같이, 보플랜지의 내력에 대한 실험치의 비를 항복내력과 최대내력으로 나누어 비교한다. 실험체 중 변위측정용 bolt hole에서 파단이 발생한 H10L13-C6과 H7L13-C9 실험체는 보플랜지의 내력 계산시, bolt hole에 의한 결손단면을 고려하여 계산하였다.

항복내력의 경우, L90계열을 제외한 모든 실험체가 보플랜지의 항복내력과 거의 일치하고 있다. L90계열에서 강관 두께 6mm 실험체는 그 내력비가 83%정도이나, 강관 두께 9mm 실험체는 그 내력비가 95%로 보플랜지의 항복내력에 근접하고 있다.

이러한 강관두께의 영향은 강관플랜지의 면외저항력으로 설명할 수 있다. 강관플랜지의 면외저항력은 일반적으로 항복선 이론에 기초하여 계산하나, 항복선의 가정은 연구자마다 다소의 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 강관 외부에 보강되는 수평스티프너의 영향을 고려하여 외다이아프래에 대한 Morita의 항복선 모델⁽¹⁾을 가정하여 강관의 면외저항력(전소성 내력)을 계산한다. 6mm 강관의 면외저항력은 23.19 tonf이고, 9mm 강관의 면외저항력은 37.30 tonf이다. 9mm 강관의 면외저항력은 보플랜지의 항복내력의 72%, 6mm 강관은 45%이다. 따라서, 수평스티프너의 길이가 보플랜지의 강도비로 70%일지라도, 강관의 면외저항력이 보플랜지의 항복내력의 70%이상으로 확보되면, 보플랜지의 항복내력에 근접한 내력을 보유할 수 있을 것으로 판단된다.

최대내력의 경우에도 항복내력과 유사하게, L90계열을 제외한 모든 실험체가 보플랜지의 최대내력과 거의 일치하고 있다. L90계열에서 강관 두께 6mm 실험체는 그 내력비가 62%정도이고 강관 두께 9mm 실험체 그 내력비가 76%로 보플랜지의 최대내력에는 미치지 못하고 있다. 비록, L130계열 실험체는 최종파괴모드는 수평스티프너와 보플랜지의 용접부의 파단이지만, 보플랜지 인장최대내력에 대한 실험치 최대내력의 비가 6mm 강관에서 92%이고, 9mm 강관에서 95% 정도이다. 따라서, 최대내력의 관점에서 수평스티프너의 길이는 보플랜지에 대한 강도비로 100% 정도 설계되면, 보플랜

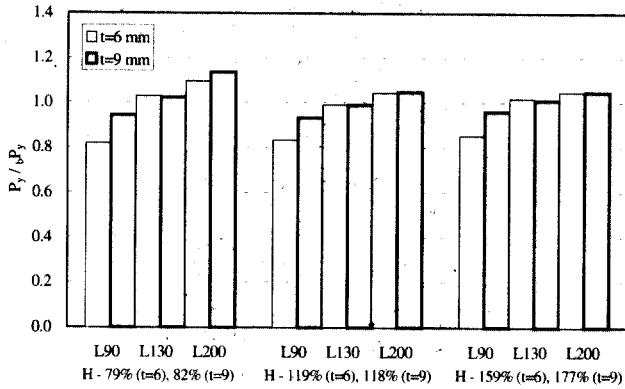


그림 5. 항복내력

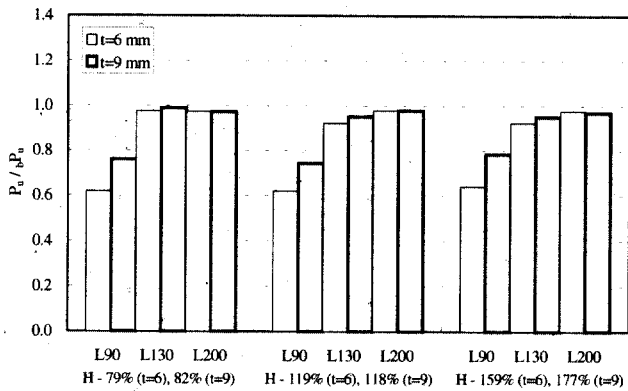


그림 6. 최대내력

지의 최대내력에 근접한 내력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 제안내력식 제안

실험체의 파괴모드에 기초하여 항복내력과 최대내력식을 제안한다.

5.1 항복내력 평가

본 접합부의 항복내력은 다음의 3가지 파괴모드를 산정하고 계산한다.

- 1) 강관웹의 인장파괴 (mode I)
- 2) 수평스티프너의 전단파괴 (mode II)
- 3) 보플랜지의 인장파괴 (mode III)

1) mode I (I Py)

수직스티프너에 의한 강관웹의 인장항복내력은 다음과 같다.

$$I P_y = 2 \cdot t_c \cdot (h_{ts} + 2t_{ts}) \cdot \sigma_y \quad (1)$$

t_c : 강관의 두께, t_{ts} : 수직스티프너의 두께
 h_{ts} : 수직스티프너의 높이, σ_y : 강관의 항복응력도

2) mode II (II Py)

수평스티프너의 전단항복내력은 다음과 같다.

$$II P_y = 2 \cdot t_{hs} \cdot l_{hs} \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad (2)$$

t_{hs} : 수평스티프너의 두께, l_{hs} : 수평스티프너의 길이
 σ_y : 스티프너의 항복응력도

3) mode III (III Py)

보플랜지의 항복내력은 다음과 같다.

$$III P_y = t_b \cdot l_b \cdot \sigma_y \quad (3)$$

t_b : 보플랜지의 두께, l_b : 보플랜지의 폭
 σ_y : 보플랜지의 항복응력도

5.2 최대내력 평가

최대내력은 항복내력 평가와 동일한 파괴모드를 산정하고, 소재의 항복응력도 대신에 인장강도를 사용한다.

1) mode I (I Pu)

수직스티프너에 의한 강관웹의 최대인장내력은 다음과 같다.

$$I P_u = 2 \cdot t_c \cdot (h_{ts} + 2t_{ts}) \cdot \sigma_u \quad (4)$$

2) mode II (II Pu)

수평스티프너의 최대전단내력은 다음과 같다.

$$II P_u = 2 \cdot t_{hs} \cdot l_{hs} \cdot \sigma_u / \sqrt{3} \quad (5)$$

3) mode III (III Pu)

보플랜지의 최대내력은 다음과 같다.

$$III P_u = t_b \cdot l_b \cdot \sigma_u \quad (6)$$

실험치에 대한 평가치의 비는 항복내력의 경우, 0.67 ~ 99, 최대내력의 경우, 0.81 ~ 1.03의 분포를 나타내고 있다. 제안식이 파괴모드에 기초하였기 때문에, 항복내력의 경우 다소 차이를 나타내고 있으나, 실험치를 안전측으로 평가하고 있다. 최대내력의 경우, 강관 9mm와 수평스티프너의 길이가 강도비로 70%인 실험체는 파괴모드와 인장거동의 차이로 그 비가 0.81 ~ 0.86으로 다소의 차이를 나타내고 있으나, 이를 제외하면, 제안식과 최대내력의 비는 0.95 ~ 1.03으로 좋은 대응을 나타내고 있다.

5.3 T-스티프너의 설계방법

접합부에 작용하는 모멘트를 상·하 보플랜지의 응력중심 간 거리로 나눈 우력으로 치환하여 접합부를 설계한다. 소성 설계에 기초하여 보의 소성모멘트(M_p)를 접합부가 받을 수 있는 최대하중으로 가정할 때, 보플랜지에는 전소성모멘트를 보플랜지의 응력중심 거리로 나눈 $T_p = M_p/d_b$ 의 우력이 작용하고, 이 우력은 좌우 스티프너에 $T_p/2$ 가 작용하는 것으로 볼 수 있다.

본 논문의 접합부와 유사한 형태의 접합부에 대한 Shanmugam 등의 연구^{(2),(3)}에서는, 수평스티프너와 수직스티프너를 종속변수로 설정하였으나, 본 실험결과, 수평스티프너와 수직스티프너는 종속변수가 아닌, 독립변수로 확인되었다. 따라서 수평스티프너와 수직스티프너는 각각 $T_p/2$ 의 힘을 기둥에 전달하기 위하여, 다음의 기준을 만족해야 한다.

$$\frac{T_p}{2} < cP_y \text{ and } \frac{T_p}{2} < sP_y \quad (7)$$

(7)식에서, cP_y 는 수직스티프너에 의한 기둥웨브의 인장력으로 다음과 같다.

$$cP_y = h_s \cdot t_c \cdot c\sigma_y \quad (8)$$

여기서, h_s : 수직스티프너의 높이

t_c : 기둥웨브의 두께

$c\sigma_y$: 기둥플랜지의 항복강도

(7)식에서, sP_y 는 수평스티프너의 전단력이다.

$$sP_y = l_s \cdot t_s \cdot s\tau_y \quad (9)$$

여기서, l_s : 수평스티프너의 길이

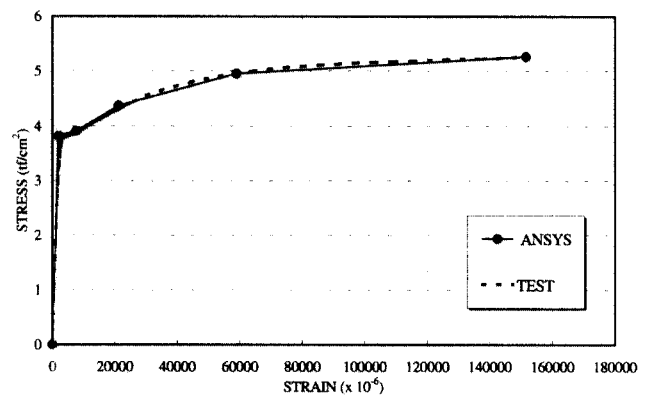
t_s : 수평스티프너의 두께

$s\tau_y$: 항복전단응력도(= $s\sigma_y/\sqrt{3}$)

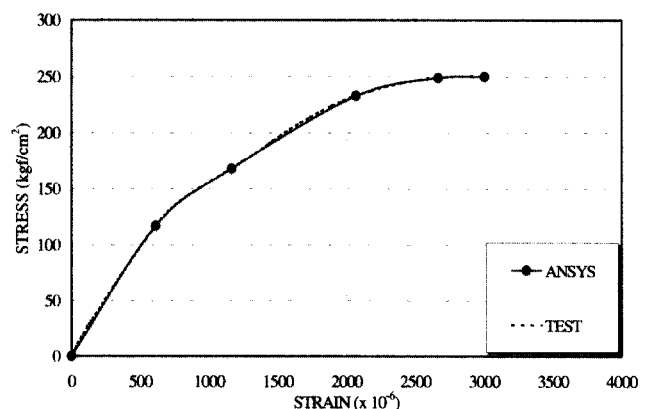
6. 유한요소해석

비선형 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 5.3을 이용하여 비선형 유한요소해석을 실시하였다.

재료의 비선형성을 해석에 반영하기 위하여, 소재시험으로부터 얻은 응력도-변형도 특성을 이용한다. ANSYS의 재료 특성치 입력은 5점까지로 제한되었기 때문에, 소재의 응력도-변형도 관계곡선은 최대한 정확히 반영하기 위하여 그림 7과 같이 5직선으로 이상화되었다. 강재는 각 절점 별로 두께가 일정하고 소성변형을 고려할 수 있는 plastic large strain 요소인 shell 43 요소를 사용하고, 프와송비는 0.3, 탄성계수는 2100t/cm²로 하였다. 콘크리트는 균열 이후에도 비선형 거동을 할 수 있는 solid 65 요소를 사용하고, 프와송비는 0.167, 탄성계수는 135kgf/cm²로 하였다. 충전콘크리트 solid 요소와 각형강관 shell 요소 사이에는, CFT 기둥-H형강 보 접합부로의 확장을 고려하여, 충전콘크리트와 강관의 합성작용을 잘 반영할 수 있는 접촉요소 CONTACT 52 요소



(a) 강재



(b) 콘크리트

그림 7. ANSYS의 재료특정치 입력

를 도입하였다.

실험체 모델링은 하중과 실험체의 대칭성을 이용하여, 1/2 축소모델을 이용하였다.

6.1 해석결과

그림 8은 대표적인 실험체로서 H10L9-C6의 최대내력시의 von mises 항복조건에 의한 stress contour와 변형형상을 나타내고 있다. 그림에서, 접촉요소에 의해 강관의 면외변

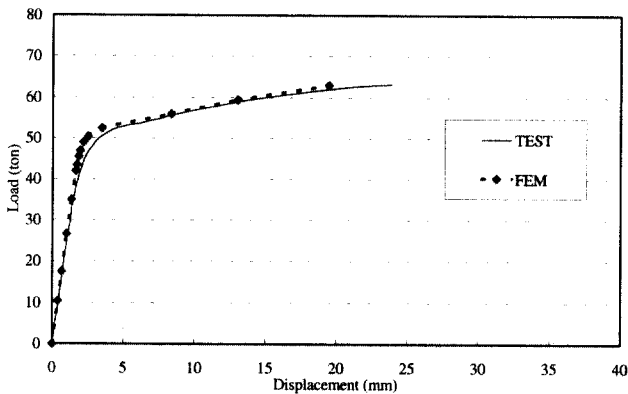
형시, 강관과 콘크리트가 분리되는 모습을 나타내었고, 각형 강관 웹 및 수직스티프너 용접지단부 및 보플랜지단부에 응력이 집중됨을 알 수 있다. 그림 9는 대표적인 실험체의 해석과 실험으로부터 얻은 하중-변형 관계곡선을 나타내었다. 그림으로부터 해석과 실험의 하중-변위 관계는 최대내력시까지도 거의 일치하는 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 실험체에 대한 해석치의 내력비는 살펴보면, 항복내력비는 0.96~1.05의 분포를, 최대내력비는 0.87~1.06으로 좋은 대응을 보인다.

7. 결론

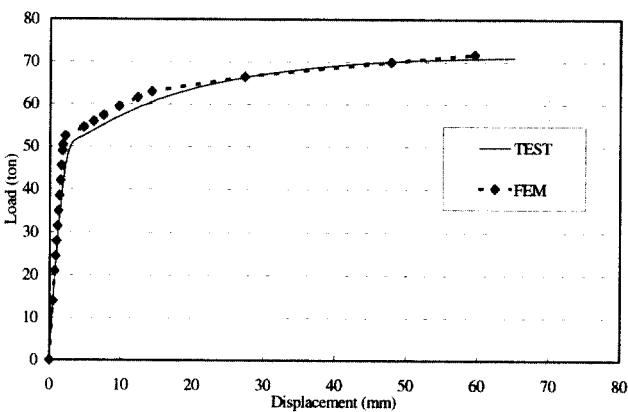
외부를 T-스티프너로 보강한 콘크리트충전 강관기둥-보플랜지 접합부에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 강관 두께의 증가는 수평스티프너가 보플랜지 강도의 70%인 실험체에서 변형능력과 내력의 증가를 유발하지만, 그 이상의 실험체에는 영향이 없는 것으로 나타났다. 따라서 수평스티프너의 길이를 보플랜지에 대한 강도비로 100% 정도 확보하면, 비록 수평스티프너가 최종적으로 파단되지만, 보플랜지로부터 도입되는 인장력의 거의 대부분(6mm 강관의 경우, 항복내력은 100%, 최대내력은 92%이상, 그리고 9mm 강관의 경우, 항복내력은 100%, 최대내력은 97%이상)을 강관기둥에 전달할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 강관 두께의 증가에 의한 강성의 증가는 수평스티프너가 보플랜지의 강도비로 70%인 90mm의 실험체에서 평균 12%이고, 수평스티프너가 보플랜지의 강도비로 100%이상인 실험체에서는 거의 없는 것으로 나타났고, 수평스티프너의 길이가 강성에 미치는 영향이 변수들 중 가장 큰 것으로 판단된다. 따라서, 수평스티프너는 보플랜지에 강도비로 100%, 그리고 수직스티프너는 73%이상으로 설계되면, 보플랜지 강성의 90%이상을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 항복내력의 관점에서, 수평스티프너의 길이는 보플랜지의 강도비로 70% 그리고, 강관의 면외저항력이 보플랜지의 항복내력의 70%이상으로 확보되면, 보플랜지의 항복내력에 근접한 내력을 보유할 수 있을 것으로 판단된다. 최대내력의 관점에서, 수평스티프너의 길이는 보플랜지에 대한 강도비로 100% 정도 설계되면, 보플랜지의 최대내력에 근접한 내력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 수직스티프너의 역할은 단지 수평스티프너로부터 도입되는 하중을 강관에 전달하는 것으로 사료된다.

그림 8. stress contour for von mises yield criteria



(a) H10L13-C6 실험체



(b) H7L13-C9 실험체

그림 9. 유한요소해석 결과

- (4) 파괴모드에 기초한 제안내력식에 대한 실험치의 비는 항복내력 0.96~1.05, 최대내력 0.87~1.06으로 좋은 대응을 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 (STRESS)후원과 포항제철(주)의 석좌교수 기금으로 수행한 연구입니다.

참고문헌

1. Morita, K. and Watanabe, H. (1990), Effect of stiffener on the strength of connection between beam and RHS column, TUBULAR STRUCTURES -the third international symposium, 172-179
2. Lee, S.L. and Shanmugam, N.E.(1993), Use of external T-stiffeners in box-column to beam connections. J. Const. Steel Res., 26, 77-98
3. Shanmugam, N.E. and Ting, L.C.(1995), Welded interior box-column to I-beam connections, J. Struct. Engrg., ASCE, 121 (5), 824-830
4. Fukumoto, T and Kobayashi, H. (1999) Connection between high-strength concrete-filled square tubular steel column and steel beam, reinforced with external stiffener, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 519, 119-126
5. 강창훈, 신경재, 오영석, 문태섭 (1998), T형 스티프너를 갖는 철근·강판보강형 콘크리트충전 각형강관 기둥-H형강 보 접합부의 거동, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 139- 144,
6. 강창훈, 신경재, 오영석, 문태섭 (2000), "외부 T-스티프너 보강 콘크리트충전 각형강관 기둥-H형강 보 접합부의 거동", 대한건축학회 논문집 구조계, 제16권 1호, 83-88,
7. 강창훈, 신경재, 오영석, 문태섭 (2000), 외부스티프너와 철근으로 보강한 CFT 기둥-H형강 보 접합부의 거동, 한국강구조학회 논문집, 제 12권, 1호, 55-63

(접수일자 : 2001년 8월 18일)