

강관 보강형 충전 각형강관 기둥-보 플랜지 접합부의 인장거동에 관한 실험적 연구

Tensile Behavior of Concrete-Filled Square Steel Tubular Column-Beam Flange Connections with Tubular Stiffeners

유 영 찬¹⁾ · 강 현 식²⁾ · 문 태 섭³⁾

Yoo, Yeong Chan · Kang, Hyun Sik · Moon, Tae Sup

요 약 : 본 연구는 콘크리트충전 각형강관을 이용한 기둥-H형강 보 접합부에 있어서 시공성과 충전성을 고려하여 강관 기둥을 외부에서 보강한 충전 각형강관 기둥-H형강보 접합부를 개발하고자 하며, 이러한 접합방식 개발을 위한 기초적 연구로 보의 인장플랜지와 강관기둥 접합부의 인장거동을 실험적으로 관찰하여 제시한 접합부의 내력 및 변형 특성을 파악한다. 시험체의 변수는 각형강관 기둥의 보강 두께($T=9, 18, 27\text{mm}$)와 높이($H=50, 80\text{mm}$)로 계획하여 총 4개의 시험체를 제작하였다. 접합부의 항복내력의 평가로 항복선 이론을 적용한 기존의 연구를 수정하여 실험치와 비교한 결과 비교적 좋은 대응을 나타냈다. 본 연구의 접합방식은 외부에서 강관 기둥을 보강하는 간단한 방법으로 보 붕괴형의 강접합을 얻을 수 있으며, 콘크리트 충전성을 확보할 수 있어 시공성에 있어서 장점으로 인정된다. 강관기둥의 두께가 8mm인 것을 고려하면 실제 구조물의 설계에 적용할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단되며, 구체적인 설계방법을 위해서는 수치 해석적인 방법에 의한 연구와 보완적인 실험이 필요한 것으로 생각된다.

ABSTRACT : The purpose of this study is to examine the utility of concrete-filled steel tubular column to H-beam connections with tubular stiffener. As a preliminary step, a tensile experiment was undertaken to scrutinize characteristics of the structural behavior that take place between beam flanges and column with tubular stiffener. A total of 4 types of experimental settings were developed as tabular stiffeners are made up 9, 18, and 27mm of thickness and 50 and 80mm of height, respectively. Along with the overall load, subsequently, the degree of displacement and strain were recorded. Based on the yield line theory, results of this study were evaluated, and further critically reviewed the applicability of the strength formula. This study found that collapse mechanism was emerged on the beam flange as reinforcing tabular stiffeners. Complementary studies of this sort, including numerical analyses, should be undertaken in order to develop specific design criteria.

핵심용어 : 충전 각형강관-H형강 보 접합부, 강관 보강, 인장거동, 항복선 이론

KEYWORDS : concrete-filled steel tubular column to H-beam connections, tubular stiffeners, tensile experiment, yield line theory

1) 정희원, 안동대학교 건축공학과 조교수
2) 정희원, 진주산업대학교 건축학과 전임강사
3) 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수, 포철석좌교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

콘크리트 충전 강관구조는 기둥은 콘크리트를 충전한 강관을 사용하고 보는 H형강을 사용하는 구조형식으로, 강관을 콘크리트로 충전 할 경우 강관은 콘크리트를 구속하여 콘크리트의 압축강도를 증가시키며 콘크리트는 강관의 압축좌굴 및 국부좌굴을 방지하여 구조적으로 상호 보완하므로 강관과 콘크리트가 독자적으로 이용된 경우보다 부재의 내력과 변형능력이 크게 상승되어 구조적 성능이 개선된다.

그러므로, 콘크리트충전 강관기둥은 단면의 증가 없이 내력이 크게 증가하므로 강관의 효율성을 증가시킬 수 있고, 결과적으로 건물의 유효 공간을 넓힐 수 있다. 또한, 콘크리트충전 강관 부재의 강관은 시공시 거푸집 역할을 하게 되어 기둥 공사시 거푸집 공사가 생략되므로 인건비의 절감 및 시공 공정상의 공기단축이 가능하여 경제적인 면에서도 유리하다.

그러나, 기존의 H형 단면재를 기둥부재로 사용하는 경우에 비해서 구조적으로는 유리하지만, 단면의 형태상 폐단면이므로 기둥-보 접합부의 시공이 까다롭고 다양하게 개발되어 있지 않으며, 콘크리트로 강관 내부를 충전할 경우 기존의 접합부는 충전성이 감소하는 문제점을 가지고 있어서, 시공상 문제점을 최소화하면서 구조적으로 성능을 개선하는 접합형식의 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 상기의 문제점을 고려하여 강관 기둥의 외부를 보강한 콘크리트충전 각형 강관 기둥-H형강보 접합부를 개발하고자 하며, 이러한 접합방식 개발을 위한 기초적 연구로 보의 인장플랜지와 충전 각형강관 기둥 접합부와의 인장거동을 실험적으로 관찰하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 시험

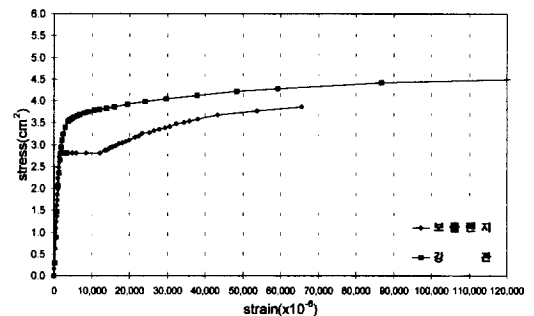
2.1 강재 인장강도시험

본 시험에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0801규준에 따라 각형강관의 평판부와 강관에서 각각 3개씩 인장 시험편을 절취하여 강재의 인장강도 시험을 실시하였다.

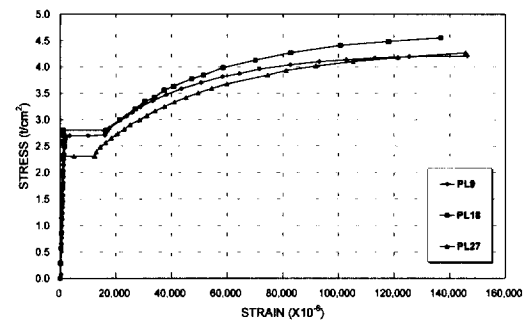
강재의 재질은 각형강관의 경우 SPSR400이고, 강관의 경우는 SS400이며, 변형도는 각 시험편의 양측에 2개의 와이어 스트레인 게이지(W.S.G.)를 부착하여 측정하며 이들의 평균값으로 응력도-변형도 관계를 파악한다.

각 시험편의 시험결과를 평균하여 응력도-변형도 관계를 각각 그림 1에 나타내었고, 항복응력(σ_y), 인장강도(σ_u), 항복비(σ_y/σ_u)를 표 1에 나타내었다.

소재시험 결과 강관의 항복점이 $3.7t/cm^2$ 으로 SPSR400의 공칭 항복점 $2.4t/cm^2$ 보다 높게 나타났다으며, 이는 냉간가공에 의한 잔류응력에 기인한 것으로 생각된다.



(a) 강관 및 보플랜지 강관



(b) 강관 보강관

그림 1. 강재의 응력도-변형도 관계 곡선

표 1. 강제 인장강도 시험결과

시험체		σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	σ_y/σ_u	Elo (%)	
인장 접합부	강관 (기둥)	3.70	4.57	0.81	24.87	
	강관 (보)	2.80	3.90	0.72	28.50	
	보강관	PL 9	2.70	4.21	0.64	21.50
		PL18	2.80	4.66	0.61	28.00
		PL27	2.31	4.63	0.54	32.25

E : 탄성계수 (2100t/cm²), σ_y : 항복점
 σ_u : 인장강도, σ_y/σ_u : 항복비, Elo. : 신장률

2.2 콘크리트 압축강도 시험

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 210kg/cm², 굵은 골재 최대치수 25mm, 슬럼프 12cm인 레미콘을 사용하였으며, 콘크리트 배합비는 표 2에 나타내었다.

표 2. 콘크리트 배합비

설계기준강도 (kg/cm ²)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	S/A (%)
210	25	12	55.3	46.4

단위 재료량(kg/m³)

W (물)	C (시멘트)	S (잔골재)	G (굵은골재)	AD (혼화제)
182	329	837	986	0.559

W/C : 물 시멘트비 S/A : 잔 골재율

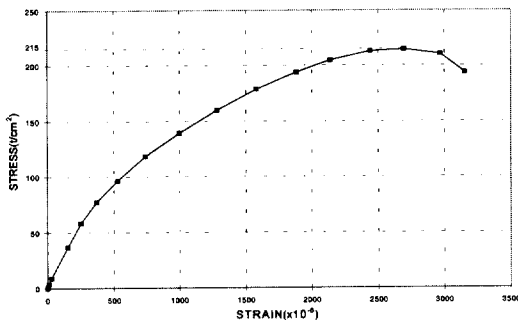


그림 2. 콘크리트의 응력도-변형도 관계 곡선

강도 시험용 공시체는 KSF 2404에 따라 15개를 제작하여, 본 실험과 동시에 압축강도 시험을 실시하였다. 콘크리트의 탄성계수는 공시체의 응력도-변형도 곡선에서 최대응력의 1/3에 해당하는 응력에 대한 할선계수(Secant Modulus)로 구하였다.

표 3. 콘크리트 압축강도 시험결과

시험	설계기준강도 (kg/cm ²)	fc' (kg/cm ²)	Ec (kg/cm ²)	Slump (cm)
인장 접합부	210	215	1.4×10 ⁵	12

fc' : 콘크리트 압축강도, Ec : 콘크리트 탄성계수

시험체에 사용된 콘크리트의 압축강도 시험결과는 15개의 공시체에 대한 시험결과를 평균하여 그림 2 및 표 3에 나타내었다.

3. 충전 각형강관 기둥-보플랜지 접합부

3.1 시험체 계획

본 실험에 이용한 시험체는 콘크리트충전이 가능하도록 강관 기둥을 외부에서 보강한 강관 보강형식으로 계획하였으며, 강관 보강형 시험체의 형상 및 치수는 그림 3에 나타내었으며, 시험체 일람은 표 4에 나타내었다.

강관 보강형 시험체는 각형강관 기둥 외부에 Built-up 각형강관을 이중으로 보강한 형식으로, 시험체의 변수는 Built-up 각형강관의 두께 (T=9, 18, 27mm)와 높이(H=50, 80mm)로 계획하였다.

각형강관은 냉간 가공된 SPSR400재질의 □-250×250×8을 사용하였고, 강관 기둥의 외부 이중 보강관은 Built-up 각형강관을 사용하여 냉간가공 강관 기둥에 상하면 모살용접으로 접합하였다. 외부 이중 보강관인 Built-up 각형강관의 제작 방법은 강관 모서리 4면을 V-cutting한 후 맞댐용접으로 제작하였다.

또한, 보플랜지와 외부 다이아프램의 접합 및 외부 다이아프램과 이중 보강관인 Built-up 각형 강관의 접합은 모두 V-cutting한 후 맞댐용접으로 제작하였다.

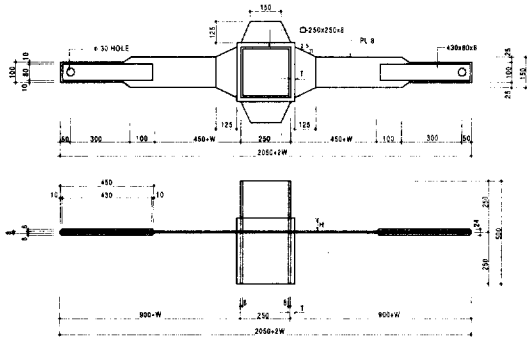


그림 3. 보플랜지 접합부 시험체의 형상 및 치수

표 4. 보플랜지 접합부 시험체 일람

시험체	T (mm)	H (mm)	시험체수
DT 9A	9	50	1
DT18A	18	50	1
DT18B	18	80	1
DT27A	27	50	1

DT 9 A 다이아프램 강종 : SS400
 ┌ 보강판 높이(A:50, B:80mm)
 └ 보강판 두께

3.2 가력 및 측정방법

가력은 사진 1과 같이 유압식 만능 시험기에 설치하여 단순 인장하는 방법으로 정적재하를 실시하였으며, 재하방법은 최대 내력을 지나 파괴모드를 얻을 때까지 진행하였다.

변형 측정은 그림 4에 나타난 측정장치를 사용하였는데, 인장플랜지 사이에 950mm의 표점거리에 좌우 2개의 변위계(D.T.)를 설치하여 측방향 변위를 측정하였다.

또한, 강관벽과 인장플랜지의 응력흐름을 파악하기 위하여 강관벽으로부터 5cm 떨어진 곳에

좌우 3개씩, W.S.G.를 부착하여 측정하였다.

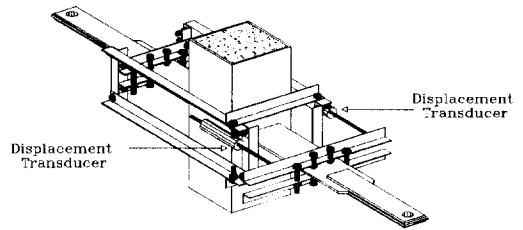
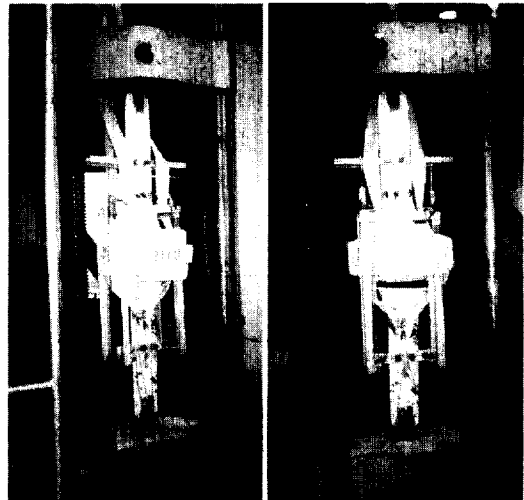


그림 4. 변위측정 장치



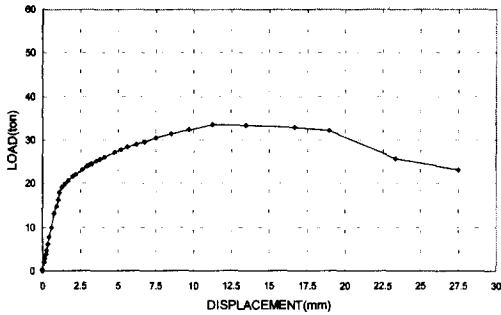
(a) 시험체 설치 상황 (b) 가력 종료 상황

사진 1. 가력 및 측정

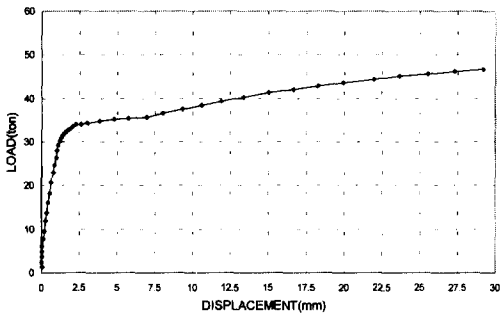
3.3 실험 결과

강관 보강형 시험체에 대한 실험결과는 그림 5에 나타내었다. 종축은 인장하중이며 횡축은 표점거리 950mm에 대한 측방향 변위이다.

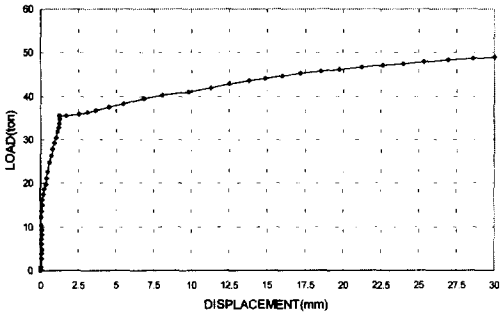
DT9A 시험체의 경우, 보강 강관의 두께(9mm)가 강관 기둥의 두께(8mm)와 비슷하게 계획된 시험체로서, 약 20ton의 하중에서 강성이 감소하며 뚜렷한 항복점을 보이지 않으며 최대하중 33.6ton에 도달한 후 파괴되었다.



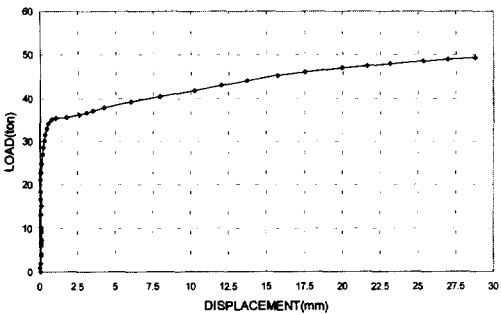
(a) DT9A 시험체



(b) DT18A 시험체



(c) DT18B 시험체



(d) DT27A 시험체

그림 5. 하중-축변위 관계 곡선

DT18A 시험체의 경우, 강관의 보강 두께가 18mm이고 플랜지상부의 높이가 50mm인 시험체로서, 34.01ton에서 항복이 발생한 후 약간의 소성변형이 발생하고 변형경화에 의해 최대하중 51.7ton에 도달하였다.



(a) DT9 시험체 (강관 보강부 파괴)



(b) DT18A 시험체 (보 플랜지 파괴)



(c) DT18B 시험체 (보 플랜지 파괴)



(d) DT27 시험체 (보 플랜지 파괴)

사진 2. 파괴형태

DT18B 시험체의 경우, 플랜지 상부의 높이가 80mm인 것을 제외하고 시험체 DT18A와 동일한 시험체로서, 35.54ton에서 항복이 발생하였으나 소성영역은 매우 작았으며 변형경화에 의해 최대하중 52.0ton에 도달하였다. DT27A 시험체의 경우, 강관의 보강 두께가 27mm로 비교적 강하게 보강된 시험체로서, 약 35.30ton의 하중에서 항복이 발생하고 곧 하중의 증가에 의해 최대하중이 51.8ton에 도달하였다.

접합부가 다소 약하게 계획된 DT9A 시험체의 경우 접합부의 항복으로 내력이 결정되었으나, 그

의 다른 시험체의 경우 모두 접합부에서는 실험 종료시까지 내력상 전혀 이상이 없는 것으로 나타났다. 플랜지의 인장력에 의해 한쪽 플랜지에서 Necking 현상이 발생하면서 종국내력이 결정되었으며, 플랜지에서 파괴가 진행되는 것을 알 수 있다. 접합부가 인장력에 대해서 다소 강하게 계획되었음을 의미한다고 볼 수 있다.

DT9A 시험체의 파괴 형상은 접합부의 항복으로 내력이 결정된 유일한 시험체이기 때문에 정확한 관찰을 할 수 없었으나, 보 플랜지에 인장하중 재하가 진행되면서 약 20ton의 하중 이후 외부 보강 강관의 강관벽이 membrane변형-국부 변형을 나타내었고, 종국에는 강관 기둥과 보강 강관벽의 모살 용접부가 파단되는 동시에 보강관인 Built-up 각형강관의 모서리 용접부 파단으로 최대내력이 결정되었다. 이 때, 강관 기둥의 플랜지 부분에서는 변형이 관찰되지 않았다.

4. 분석 및 고찰

4.1 내력 비교

본 연구는 제안된 형식의 접합방법에 대한 구조적 성능의 검토로서, 강관의 내부에 콘크리트충전이 가능하도록 강관 기둥을 외부에서 보강한 강관 보강형식으로 계획한 접합방법이 기둥과 보의 강접합에 구조적으로 요구되는 성능을 보유하고 있는지 여부를 확인하고자 하는 것이다.

일반적으로 접합부는 강성, 강도 및 연성을 요구하고 있으며, 국부적으로 좌굴이나 조기균열 등의 파괴가 발생하지 않아야 한다.

그림 6은 4개의 강관 보강형 시험체에 대한 하중-변형 곡선을 비교한 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 시험체 DT9A는 충분한 탄성강성과 강도를 보유하지 못함을 알 수 있으며, 시험체 DT18B와 시험체 DT27A를 비교하면 강관의 보강 두께가 27mm인 시험체 DT27A는 필요이상으로 두껍게 계획된 것을 알 수 있다. 외부강관의 두께가

18mm인 시험체 DT18B의 결과는 항복하중에 도달한 후 약간의 소성영역을 나타내며 강도가 증가하였고 최대강도는 항복강도의 1.46배로 나타났다. 플랜지 상부의 높이가 50mm인 시험체 DT18A와 높이가 80mm인 시험체 DT18B를 비교하면 시험체 DT18A가 약간 낮은 항복강도를 보였으며 소성영역이 크게 나타났지만, 두 시험체의 거동은 전체적으로 충분히 강접합으로 이용될 수 있는 실험 결과를 보였다.

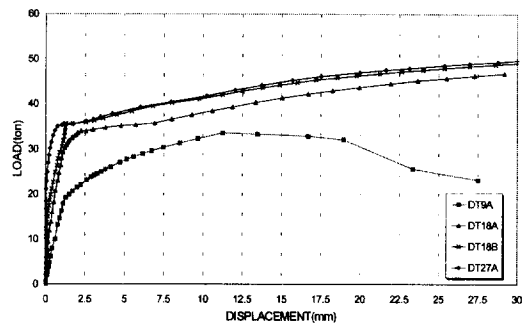


그림 6. 강관 보강형 시험체의 하중-축변위 관계 곡선

실험 결과로 볼 때, 본 연구의 접합부 형식을 실제 접합부 설계에 적용할 수 있는 가능성을 보여 주고 있다. 다만, 강관의 보강 두께와 높이 등 설계를 위한 형상을 결정하는 정확한 정보는 보 플랜지와 기둥 강관등 구조 부재와의 상호 관계를 정확히 조사하여야 하며, 추후 수치 해석적인 방법에 의한 연구와 필요한 경우 보완적인 실험이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

4.2 내력평가

강관 보강형 충전 각형강관 기둥-보 플랜지 접합부의 인장거동은 다음의 2가지 형식에 의해서 파괴되리라 예상된다.

- i) 강관벽과 보플랜지 사이의 접합부 인장파괴 (Case1)
- ii) 보플랜지의 인장파괴 (Case2)

본 연구에서는 각 파괴모드의 항복시의 하중을 예측하는 방법을 제시하고, 실험 결과와 비교한다.

(1) Case1 ($I P_y$)

보 플랜지가 직접 강관벽에 용접되어 접합된 경우의 항복 내력에 대한 예측식은 항복선 이론을 이용한 T. R. Higgins¹⁾의 모델이 제안되어 있고, 그 후에 이를 수정한 G. Davis, J. A. Packer²⁾의 모델과 K. Morita³⁾의 모델 등이 있으나, 본 연구에서는 비교적 간단하고, 하한치를 주는 것으로 판단되는 T. R. Higgins의 모델을 일부 수정하여 이용하기로 한다.

T. R. Higgins의 역학모델에서 이용한 주요한 가정은 다음과 같다.

- i) 강관벽에는 그림 7에 나타난 항복 Mechanism이 형성된다. 여기서, 항복선 AA, A'A'와 보플랜지 중심간의 거리(x)를 $x=6t_c$ 로 한다.
- ii) 보플랜지에는 등분포 응력이 작용한다.
- iii) 강관벽의 단위 길이당 항복 moment는 항복선 AA'에 대해서는 0으로, 다른 항복선에 대해서는 $M_p = (t_c^2 \cdot \sigma_y) / 4$ 로 한다. 여기서, t_c 는 강관벽의 두께, σ_y 는 강관의 항복점이다.

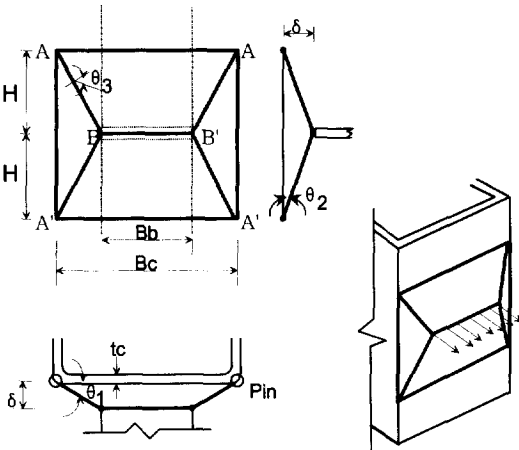


그림 7. 강관벽의 항복 Mechanism

이상의 T. R. Higgins의 역학모델의 주요한 가정 중 가정 i)의 항복선 AA, A'A'와 보 플랜지 중심간의 거리(x)를 본 연구의 변수인 H가 $6t_c$ 보다 다소 짧은 것을 고려하여 $x = H$ 로 수정하여 적용한다.

이상의 가정에 의한 보 플랜지의 항복내력의 평가식은 다음과 같다.

$$I P_y = \left\{ \frac{B_c}{H} + \frac{2H}{B_c - B_b} \right\} t_c^2 \cdot \sigma_y$$

여기서, B_b 는 보플랜지의 폭, B_c 는 강관의 폭이다.

(2) Case2 ($II P_y$)

이 경우의 항복내력은 다음 식으로 평가한다.

$$II P_y = \sigma_y \cdot A_f$$

여기서, σ_y 는 보 플랜지의 항복강도, A_f 는 플랜지의 단면적이다.

이상의 각각의 경우 항복내력의 평가치와 실험치의 비교를 표 5에 나타내었는데, 각 경우의 평가치 중 최소치를 항복내력의 평가치(밑줄친 값)로 하여, 실험치와의 비도 함께 나타내었다.

표 5 항복내력의 평가치와 실험치의 비교

(단위: ton)

시험체	$e P_y$	$I P_y$	$II P_y$	$P_y / e P_y$
DT 9A	21.60	23.87	33.60	1.11
DT18A	34.01	77.01	33.60	0.99
DT18B	35.54	74.83	33.60	0.95
DT27A	35.30	133.57	33.60	0.95

표 5에서 보는 바와 같이 상기의 항복내력의 평가 방법은 실험결과를 비교적 잘 설명해 주고 있는 것으로 볼 수 있다.

DT9A 시험체의 실험치 항복내력이 평가치와 약간의 차이를 보이는 것은 사진 2에서 알 수 있듯이 강관과 보강판의 용접부에서 파괴된 것으로 볼 때, 시험체 제작시 용접부의 목두께가 충분히

확보되지 못한 것에 기인한 것이다. 만일 용접부의 목두께가 충분히 확보 될 경우, 용접부 파괴에 선행하여 용접부와 인접한 보강 강관에서 항복선이 형성되고 실험치 항복 내력은 평가치 항복내력에 접근한 값을 나타낼 것으로 사료된다.

본 연구의 실험에서는 용접부에서 파괴되어 내력이 결정되었으나 이 때 측정된 실험치 내력은 보강 강관에서 항복선이 형성될 경우의 내력에 근접한 경계치로 추정되며 용접부의 목두께가 충분히 확보 될 경우에도 보플랜지 붕괴형의 충분한 강성 및 강도를 갖기에는 보강 강관의 두께가 부족한 것으로 사료된다.

DT9A 시험체를 제외한 다른 시험체의 Case1에 의한 항복내력의 평가치는 보 플랜지의 항복내력에 비하여 월등히 높는데 이것은 강관 보강을 지나치게 두껍게 보강하였기 때문이며, 보 붕괴의 파괴형식으로 유도하기 위해서는 강관의 보강 두께를 강관 두께의 1.5배정도로 보강하면 충분하리라 사료된다.

5. 결 론

콘크리트 충전 각형강관기둥과 H형강보의 플랜지의 접합부 형식으로 기둥과 보의 접합강성을 유지하며 현장에서의 콘크리트 충전성을 확보할 수 접합방식을 제안하고, 제안된 접합방식에 대해 구조적인 성능을 조사하고자 총 4개의 시험체를 제작하여 실험적인 연구를 수행하여 구조적 거동을 분석한 결과, 본 연구의 실험적 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

강관 보강형 접합 시험체에 대한 실험결과는 9mm두께의 강관 보강인 경우 충분한 강성 및 강도를 갖지 못하였다. 그러나 18mm 두께의 강관 보강형인 경우 구조적으로 요구되는 충분한 성능을 보여주었다. 항복이 발생할 때까지 초기강성을 유지하였으며 항복 후에도 최대강도에 도달할 때까지 구조적인 결함이 발생하지 않았다.

강관 보강형 충전 각형강관 기둥-보 플랜지 접

합부의 항복내력을 평가하는 방법으로서, 2가지 형식의 파괴모드를 상정한 후, 각 경우 중에서 최소치가 되는 것을 항복내력의 평가식으로 하여 실험치와 비교한 결과 비교적 좋은 대응을 보이고 있다.

일반적으로, 골조의 붕괴형식은 보 붕괴형으로 되는 것이 바람직하다고 할 때, 본 연구의 접합방식은 외부에서 강관 기둥을 보강하는 간단한 방법으로 보 붕괴형의 강접합을 얻을 수 있으며, 콘크리트 충전성을 확보할 수 있어 시공성에 있어서 장점으로 인정된다.

강관기둥의 두께가 8mm인 것을 고려하면 실제 구조물의 설계에 적용할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단되며, 구체적인 설계방법을 위해서는 수치 해석적인 방법에 의한 연구와 보완적인 실험이 필요한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. O. W. Blodgett, "Design of Welded Structures", The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, June, 1966, pp. 3.6.-6~9
2. G. Davies, J. A. Packer, "Predicting the strength of branch plate-RHS Connections for punching shear", Can. J. Civ. Eng. Vol.9, 1982
3. 森田耕次, 江波戸和正, 渡邊人, 山本昇, 安田博和, 里見孝之, "箱形断面柱-H形断面はり接合部ダイアフラム補強に関する研究", 日本建築學會鋼造系論文報告集 第388號, 1988年 6月
4. 森田耕次 外 3人, "コンクリート充てん鋼管柱-鐵骨はり接合部の内ダイ アフラム補強に関する研究", 日本建築學會構造系論文報告集, 第422號 1991. 4..
5. 유영찬, 이승준, 문태섭, "외부다이어프램으로 보강한 콘크리트충전 각형강관 기둥-H형강보 접합부의 거동", 韓國鋼構造學會 論文集, 第9卷 第2號 (通卷31號) 1997. 6.

(접수일자 : 2000년 10월 10일)