

스티프너로 보강한 콘크리트 충전 원형 강관기둥의 부착응력에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on a Bond Stress in Concrete Filled Circular Steel Tubular Column Strengthened by the Stiffener

박 성 무* 김 성 수** 김 원 호*** 이 형 석***
Park, Sung-Moo Kim, Sung-Su Kim, Won-Ho Lee, Hyung-Seok

Abstract

This paper is presented an experimental studies on bond stress between steel and concrete in concrete filled steel tubes. In the actual building frames, vertical dead and live loads on beams are usually transferred to columns by beam-to-column connections. In case when concrete filled steel tubes are used as columns of an actual building frame which has a simple connection, shear forces in the beam ends are not directly transferred to the concrete core but directly to the steel tube. Provided that the bond effect between steel tube and concrete core should not be expected, none of the end shear in the beams would be transferred to the concrete core but only to the steel tube. Therefore, it is important to investigate the bond strength between steel tube and concrete core in the absence of shear connectors.

keywords : Shear-Connector, Bond Stress, Concrete Filled Steel Tubular Column

1. 서 론

최근의 고층화된 건축물은 거주성 및 경제성의 관점에서 철골과 콘크리트의 장점을 최대한 발휘할 수 있는 복합구조를 사용하고 있는데, 특히 철근콘크리트와 철골철근콘크리트 기둥 시스템이 주목을 받고 있다. 콘크리트 충전강관기둥 시스템 구조는 강관의 국부좌굴을 막고, 콘크리트의 축압축력 및 열용량으로 내화성능을 높이고, 강재의 일부를 콘크리트로 치환함으로써 가격을 줄일 수 있는 잇점을 가지고 있다. 그러나 국내·외적으로 충전강관기둥시스템에 있어서 보-기둥 접합부의 응력 전달기구가 명확하지 않을 뿐만 아니라, 접합부 접촉면의 전단응력에 의한 슬립 거동의 구조적 관계가 명확히 규명되어 있지 못하다. 실제 구조물에서 보면, 연직방향으로 작용하

는 보의 고정 및 활 하중은 보-기둥 접합부에 의해서 기둥으로 전달된다. 단순한 접합부를 가진 콘크리트 충전강관기둥이 구조물의 기둥으로 사용될 경우에는 보 단부의 전단력이 충전된 콘크리트에 전달되는 것이 아니고, 강관에만 전달된다.

따라서, 강관과 충전 콘크리트사이의 부착효과를 기대할 수가 없다. 그러므로 본 연구는 강관과 충전 콘크리트 사이의 부착응력을 평가하기 위해서 기존의 연구자들의 실험결과를 토대로 변수를 정하고, Push-Out 실험을 수행하였다.

2. 실 험

2.1 시험체 제작

본 연구는 콘크리트 충전 원형강관 기둥 부재의 부착응력에 대한 Shear-Connector가 미치는 영향을 평가를 목적으로 한 실험적 연구로서 기준 시험체 (CS-B, CC-B)를 중심으로 콘크리트 압축강도, 강관

* 정회원 · 영남대학교 건축학부 교수
** 정회원 · 청주대학교 건축공학과 교수
*** 정회원 · 영남대학교 대학원 박사과정

의 D/t비, Shear-Connector의 형상·개수·위치·단면적·강도·간격을 주요변수로 하여 시험체를 제작하였으며, 시험체의 일람은 <표1(a), (b)>와 같다.

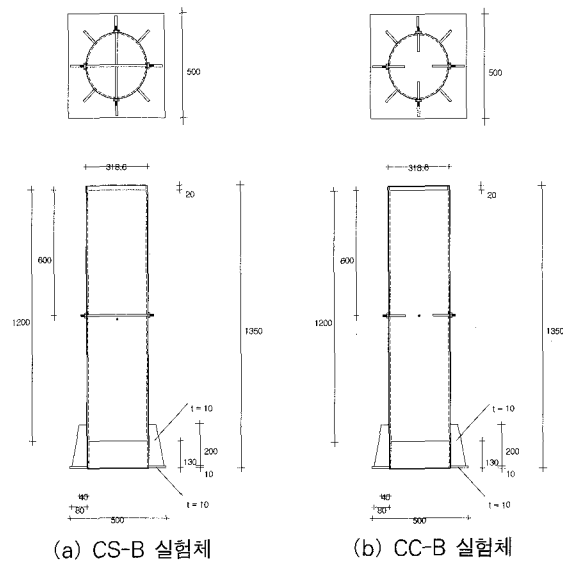
<표 1.(a)> 콘크리트 충전 원형강관 기둥(관통형)

시험체명	콘크리트강도	D/t비	적용 변수					
			Shear-Connector					
			형태	개수	위치	지름	강도	간격
CS-O	240		無	-	-	-	-	-
CS-C1	210	45.5	관통형	2	중양	10	일반	600mm 400mm 300mm 240mm
CS-B	240							
CS-C2	270							
CS-C3	400							
CS-R1	46.4							
CS-B	45.5							
CS-R2	50.8							
CS-N1								
CS-B								
CS-N2								
CS-L1								
CS-B								
CS-L2								
CS-D1								
CS-B								
CS-D2								
CS-B								
CS-H1								
CS-B								
CS-S1								
CS-S2								
CS-S3								

<표 1.(b)> 콘크리트 충전 원형강관 기둥(단속형)

시험체명	콘크리트강도	D/t비	적용 변수					
			Shear-Connector					
			형태	개수	위치	지름	강도	간격
CC-C1	210	45.5	단속형	4	중양	10	일반	600mm 400mm 300mm 240mm
CC-B	240							
CC-C2	270							
CC-C3	400							
CC-R1	46.4							
CC-B	45.5							
CC-R2	50.8							
CC-N1								
CC-B								
CC-N2								
CC-L1								
CC-B								
CC-L2								
CC-D1								
CC-B								
CC-D2								
CC-B								
CC-H1								
CC-B								
CC-S1								
CC-S2								
CC-S3								

Shear-Connector로는 실제 현장에서의 적용성을 고려하여 볼트를 사용하였다. 그리고, Push-Out 실험을 수행하기 위해 강관 하부에 Air-Gap을 두어 콘크리트의 슬립(slip)을 허용하였고, Air-Gap으로 인한 강관 하부 자체의 국부좌굴을 방지하기 위해 Air-Gap을 둔 강관부분에 두께 10mm, 높이 200mm의 스티프너(Stiffener)를 대어 용접하고, 하부면에 플레이트(500×500×10)를 용접하였다. 관통형 및 단속형 기준 실험체의 형상은 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 관통형 및 단속형 기준실험체

2.2 재료 시험

시험체 제작시 사용된 콘크리트 압축강도와 강재의 인장강도 시험결과는 다음 <표 2>와 <표 3>와 같다.

2.3 가력 및 측정방법

본 실험은 U.T.M.에서 Push-Out 실험을 수행하였다. 하중의 측정은 U.T.M.에 연결된 Data Logger (TDS-602)을 이용하여 측정하였다. 변위의 측정은 시험체의 전, 후면에 200mm의 전기식 변위측정기(LVDT)를 부착하여 하중단계에 따른 슬립의 양을 측정하여 평균값을 이용하였고, 강관에 대한 축하중과 변형을 관계를 정의하기 위해 시험체 설치 전에 시험체의 길이방향으로 외부면을 따라 세로방향으로 Strain Gauge를 부착하여 변형률을 측정하였고, 콘크리트와 강관 사이 접선방향의 변형과 국부적 반

지름 방향의 부착응력의 존재를 살펴보기 위해서 가로방향으로 Strain Gauge를 부착하여 변형률을 측정하였다.

<표 2> 압축강도시험용 공시체 시험결과

설계 기준강도 (kgf/cm ²)	f_{ck} (kgf/cm ²)	E_c (kgf/cm ²)	Sump (cm)	굵은골재 최대치수 (mm)
210	193	2.2×10 ⁵	15	25
240	228	2.4×10 ⁵	15	25
270	259	2.5×10 ⁵	15	25
400	358	2.8×10 ⁵	12	25

<표 3> 강재의 인장강도 시험결과

σ_y (tf/cm ²)	σ_u (tf/cm ²)	σ_y / σ_u	ϵ_y (× 10 ⁶)
3.78	4.16	0.91	1,923

<표 4> 관통형 시험체의 Push-Out 실험결과

시험체명	l (mm)	P_u (tf)	τ_u (kgf/cm ²)	δ_u (mm)	P_{su} (tf)	δ_{su} (mm)
C-O	1210	30.64	2.65	0	-	-
CS-B	1190	34.25	3.01	1	32.61	8
CS-C1	1190	32.13	2.82	0	33.18	7
CS-C2	1190	37.18	3.27	0	38.23	9
CS-C3	1200	38.68	3.37	0	40.13	9
CS-R1	1190	39.5	3.99	0	40.65	6
CS-R2	1180	39.95	2.65	0	43.45	7
CS-L1	1170	34.71	3.10	1	34.02	7
CS-L2	1180	31.88	2.82	0	30.83	7
CS-N1	1170	30.25	2.70	1	28.25	7
CS-N2	1190	38.23	3.36	0	45.25	7
CS-D1	1190	32.72	2.87	0	32.06	7
CS-D2	1170	33.75	3.01	0	38.15	6
CS-H1	1190	40.9	3.43	0	42.35	12
CS-S1	1190	37.15	3.12	0	51.45	6
CS-S2	1210	48.75	4.03	0	70.25	5
CS-S3	1180	60.6	5.13	0	76.55	4

3. 실험결과 및 분석

축력을 받는 콘크리트 충전 원형강관 기둥의 부착응력에 Shear-Connector가 미치는 영향을 파악하기 위한 실험결과에서 각 실험체 마다의 최대부착응

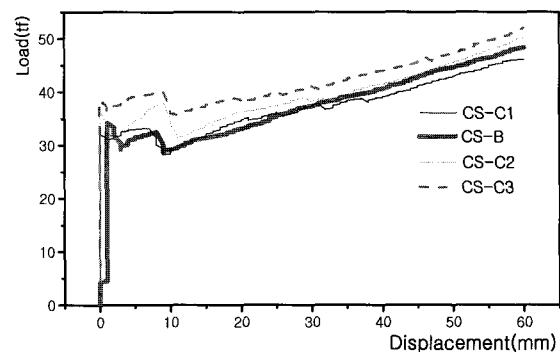
력과 Shear-Connector 항복시 내력 및 변위를 <표 4>과 <표 5>에 나타내었다.

<표 5> 단속형 시험체의 Push-Out 실험결과

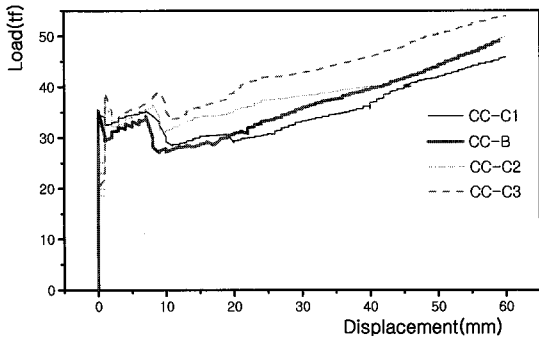
시험체명	l (mm)	P_u (tf)	τ_u (kgf/cm ²)	δ_u (mm)	P_{su} (tf)	δ_{su} (mm)
CC-B	1180	35.4	3.14	0	34.34	7
CC-C1	1190	34.55	3.03	0	35.34	7
CC-C2	1190	36.6	3.21	1	36.58	8
CC-C3	1180	38.87	3.44	1	39.26	9
CC-R1	1180	42.25	4.31	0	44.7	6
CC-R2	1170	42.05	2.81	3	51.3	12
CC-L1	1170	36.8	3.29	0	35.13	7
CC-L2	1160	32.66	2.94	1	33.43	7
CC-N1	1160	30.02	2.72	3	31.42	5
CC-N2	1190	39.81	3.5	1	46.37	8
CC-D1	1200	32.53	2.83	0	31.42	5
CC-D2	1190	37.43	3.29	0	38.64	8
CC-H1	1210	49.08	4.05	0	52.62	8
CC-S1	1230	46.95	3.81	2	87	16
CC-S2	1170	38.15	3.26	1	76.8	13
CC-S3	1180	46.3	3.92	0	114.2	12

3.1 콘크리트 압축강도에 따른 영향

콘크리트 충전 원형강관 기둥 시험체에서 콘크리트 압축강도를 변수로 하였을 경우, Shear-Connector가 강관과 콘크리트의 부착응력에 미치는 영향은 Shear-Connector의 보강이 없는 경우에 대해 Shear-Connector를 사용한 경우 관통형은 약 1.17배 정도, 단속형은 1.18배 정도 부착응력의 증가 효과가 있었고, Shear-Connector를 사용한 경우 실험범위 내에서 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 부착응력이 증가함을 알 수 있었다.



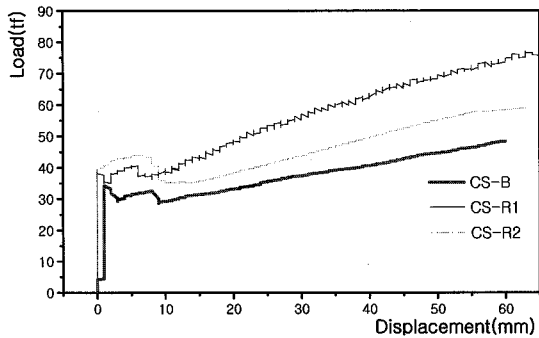
<그림 2> CS-C1, C2, C3 시험체의 하중-변위곡선



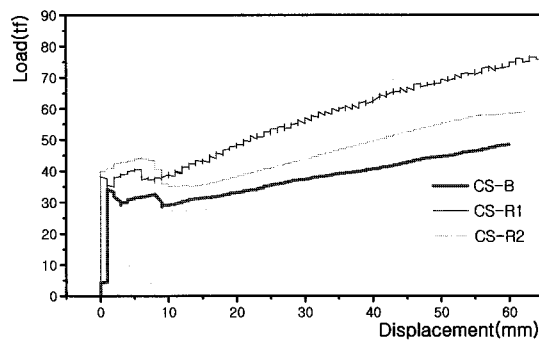
〈그림 3〉 CC-C1, C2, C3 시험체의 하중-변위 곡선

3.2 강관의 D/t비에 따른 영향

콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 강관의 D/t비에 따른 영향을 통해 실험결과에서는 강관의 D/t비가 부착응력에 별 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 강관의 지름(D)이 작아질수록 부착응력이 증가함을 알 수 있었다.



〈그림 4〉 CS-R1, R2 시험체의 하중-변위 곡선

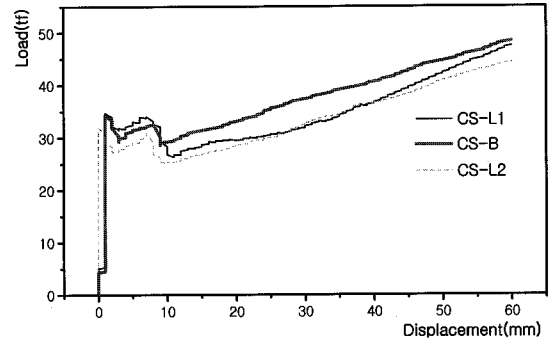


〈그림 5〉 CS-R1, R2 시험체의 하중-변위 곡선

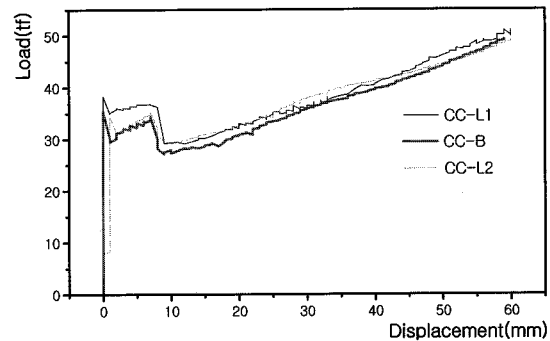
3.3 Shear-Connector의 위치에 따른 영향

콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 관통형(CS계열)과 단속형(CC계열) 모두 Shear-Connector의 위치가 하부에서 상부로 갈수록 부착응력이 다소 증가

함을 알 수 있었다. 이는 곧 실제 철골 보-충전강관 기둥 접합에서 기둥의 하부에 Shear-Connector를 두는 것이 효과가 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다.



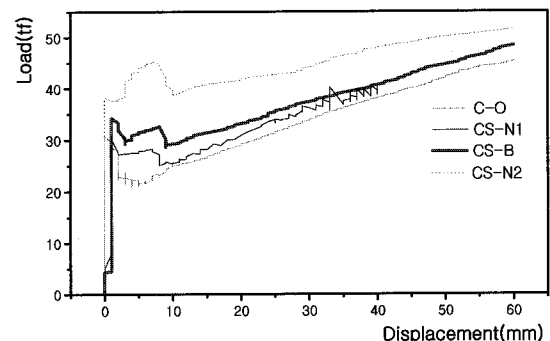
〈그림 6〉 CS-L1, L2 시험체의 하중-변위 곡선



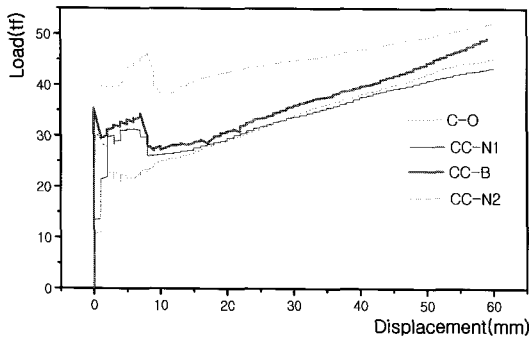
〈그림 7〉 CC-L1, L2 시험체의 하중-변위 곡선

3.4 Shear-Connector의 개수에 따른 영향

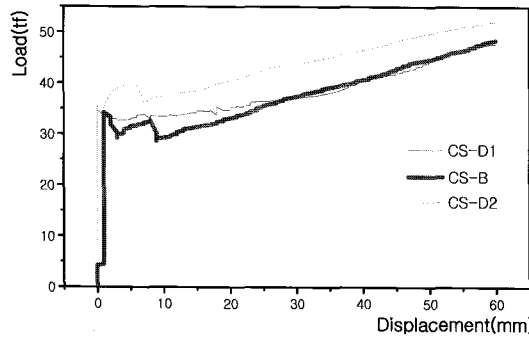
콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 Shear-Connector의 개수가 증가할수록 부착응력이 증가함을 알 수 있었다. 관통형(CS계열)의 경우 Shear-Connector 1개당 약 $0.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ 정도, 단속형(CC계열)의 경우 Shear-Connector 1개당 약 $0.39\text{kgf}/\text{cm}^2$ 정도의 부착응력 증가가 있음을 알 수 있었다.



〈그림 8〉 CS-N1, N2 시험체의 하중-변위 곡선



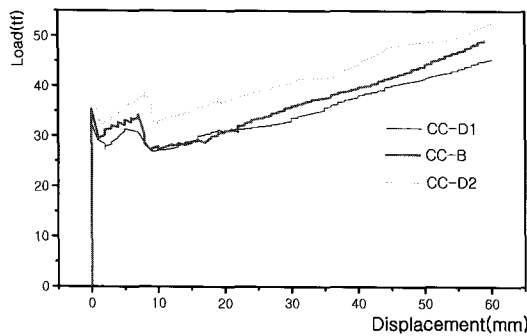
〈그림 9〉 CC-N1, N2 시험체의 하중-변위 곡선



〈그림 10〉 CS-D1, D2 시험체의 하중-변위 곡선

3.5 Shear-Connector의 지름에 따른 영향

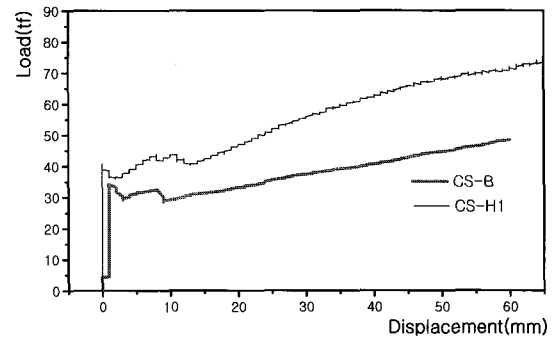
콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 Shear-Connector의 지름이 증가할수록 부착응력이 증가함을 알 수 있었다. 그러나 실험 결과에서 Shear-Connector 지름의 증가가 부착응력에 그다지 큰 영향을 미치지 않으나, 단속형의 경우 Shear-Connector의 지름이 증가할수록 부착응력 또한 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 콘크리트 충전 원형강관 기둥의 강관과 콘크리트의 부착응력에 있어 Shear-Connector로 보강할 경우 Shear-Connector의 지름이 증가할수록 부착항복 이후 강관과 콘크리트의 슬립(Slip) 거동에 매우 효과적임을 알 수 있었다.



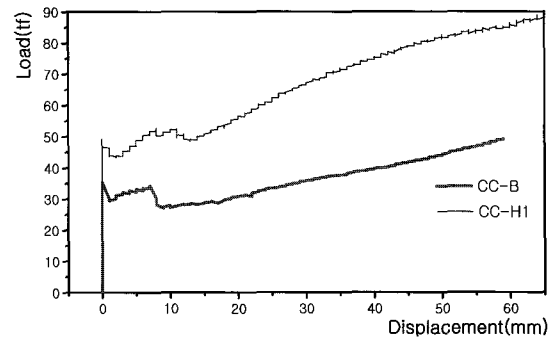
〈그림 11〉 CC-D1, D2 시험체의 하중-변위 곡선

3.6 Shear-Connector의 강도에 따른 영향

콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 Shear-Connector의 강도가 증가할수록 부착응력이 크게 증가함을 알 수 있었다. 특히, 단속형 시험체(CC계열)의 경우 부착응력이 기준 시험체(CC-B)에 대해 약 1.3배정도 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 강관과 콘크리트의 부착응력 증가를 위한 Shear-Connector의 적용시 단속형 고력볼트를 사용함이 효과적임을 알 수 있다.



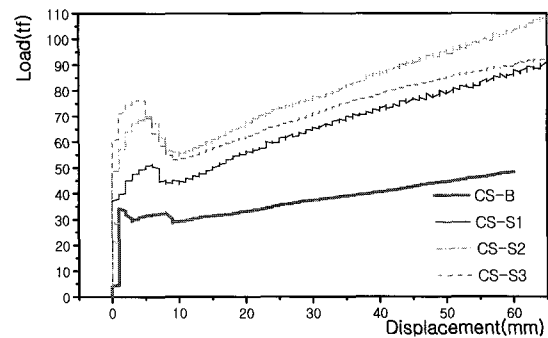
〈그림 12〉 CS-H1 시험체의 하중-변위 곡선



〈그림 13〉 CC-H1 시험체의 하중-변위 곡선

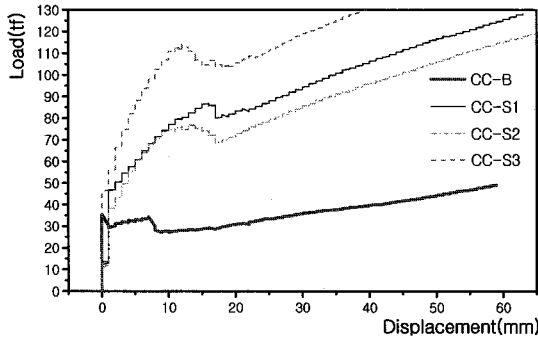
3.6 Shear-Connector의 간격에 따른 영향

콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 Shear-Connector



〈그림 14〉 CS-S1, S2, S3 시험체의 하중-변위 곡선

의 간격이 작아질수록 Shear-Connector의 개수가 증가하게 되어 매우 큰 부착응력 향상 효과를 기대할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 2차 항복시의 하중 또한 급격한 증가를 보임을 알 수 있었다.



<그림 15> CC-S1, S2, S3시험체의 하중-변위 곡선

4. 결 론

축력을 받는 콘크리트 충전 원형강관 기둥의 부착응력에 있어 Shear-Connector가 미치는 영향을 파악하기 위하여 Push-Out 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) Shear-Connector를 보강한 콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 강관과 콘크리트의 부착응력은 콘크리트 압축강도 193kgf/cm²~358kgf/cm² 범위에서 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었다. 그러나 193kgf/cm²~259kgf/cm² 범위에서는 콘크리트 압축강도가 10kgf/cm² 증가에 약 0.05kgf/cm² 증가하나, 259kgf/cm²~358kgf/cm² 범위에서는 콘크리트 압축강도 10kgf/cm² 증가에 약 0.01kgf/cm²의 미소한 증가가 있음을 알 수 있었다.
- (2) Shear-Connector로 보강한 콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 강관의 D/t비에 따른 영향을 통해 실험결과에서는 강관의 D/t비가 부착응력에 별 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 강관의 지름(D)이 작아질수록 부착응력이 증가함을 알 수 있었다.
- (3) Shear-Connector를 보강한 콘크리트 충전 원

형강관 기둥에서 관통형(CS계열)과 단속형(CC계열) 모두 Shear-Connector의 위치가 하부에서 상부로 갈수록 부착응력이 다소 증가함을 알 수 있었다. 이는 곧 실제 철골 보-충전 강관 기둥 접합에서 기둥의 하부에 Shear-Connector를 두는 것이 효과가 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다.

- (4) Shear-Connector를 보강한 콘크리트 충전 원형강관 기둥에서 Shear-Connector의 개수가 증가할수록 부착응력이 증가함을 알 수 있었다. 관통형(CS계열)의 경우 Shear-Connector 1개당 약 0.3kgf/cm² 정도, 단속형(CC계열)의 경우 Shear-Connector 1개당 약 0.39kgf/cm² 정도의 부착응력 증가가 있음을 알 수 있었다. 그러나, Shear-Connector의 개수에 따른 부착응력의 상관관계에 대해 보다 많은 연구를 통해 명확한 규명이 필요한 것을 판단된다.
- (5) Shear-Connector의 지름이 증가할수록 부착응력이 증가함을 알 수 있었다. 그러나 실험 결과에서 Shear-Connector 지름의 증가가 부착응력에 그다지 큰 영향을 미치지 않으나, 단속형의 경우 Shear-Connector의 지름이 증가할수록 부착응력 또한 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 콘크리트 충전 원형강관 기둥의 강관과 콘크리트의 부착응력에 있어 Shear-Connector로 보강할 경우 Shear-Connector의 지름이 증가할수록 부착항복이후 강관과 콘크리트의 슬립(Slip)거동에 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (6) Shear-Connector의 강도가 증가할수록 부착응력이 크게 증가함을 알 수 있었다. 특히, 단속형 시험체(CC계열)의 경우 부착응력이 기준 시험체(CC-B)에 대해 약 1.3배정도 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 강관과 콘크리트의 부착응력 증가를 위한 Shear-Connector의 적용시 단속형 고력볼트를 사용함이 효과적임을 알 수 있다.

- (7) Shear-Connector의 간격이 작아질수록 Shear-Connector의 개수가 증가하게 되어 매우 큰 부착응력 향상 효과를 기대할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 2차 항복시의 하중 또한 급격한 증가를 보임을 알 수 있었다.
- (8) 관통형과 단속형 시험체에 대해서는 적용변수 모두에 대해 단속형이 관통형보다 더 큰 부착응력 값을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 부착항복이후 슬립(Slip)거동에 있어서도 같은 슬립(Slip)량에 대해 단속형이 관통형보다 큰 하중을 견딜 수 있음을 알 수 있었다.
- (9) 실험결과의 평균 부착응력은 각각의 변수에 대해 관통형 시험체는 3.12, 3.22, 2.98, 3.02, 2.96, 3.22, 3.82kgf/cm², 단속형 시험체는 3.21, 3.39, 3.12, 3.12, 3.09, 3.6, 3.53kgf/cm²로 나타났고, 이는 BS 8110에서 제시하는 부착응력 (4.08kgf/cm²)보다는 약 0.8배정도 낮으나, AIJ Code에서 제시하는 부착응력(1.5kgf/cm²)보다는 약 2.2배정도 높음을 알 수 있었다.

5. 감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형구조시스템연구센터의 연구비 지원하에 이루어진 연구의 일부로 이에 감사를 드립니다

기 호

- σ_y : 항복점
- σ_u : 인장강도
- σ_y / σ_u : 항복비
- ϵ_y : 항복변형도
- l : 콘크리트와 강관의 부착길이
- P_u : 부착 항복시 하중
- P_{su} : shear-connector 항복시 하중
- δ_u : 부착 항복시 변위
- τ_u : 최대부착응력
- δ_{su} : shear-connector 항복시 변위

참고문헌

1. BS 5400 Steel, concrete and composite and bridges : Part 5 : Code of practice for design of composite bridges, London, British Standards Institution, 1979
2. BS 5950 Structural use of steelwork in building : Part 1 : Code of practice for design in simple and continuous construction : hot rolled sections, London, British Standards Institution, 1985
3. BS 8110 Structural use of concrete : Part 1 : Code of practice for design construction, London, British Standards Institution, 1985
4. H. Shakir-Khalil, "Resistance of concrete-filled steel tubes to pushout forces", The Structural Engineer, Volume 71, No 13, 1993
5. H. Shakir-Khalil, "Pushout strength of concrete filled steel hollow sections", The Structural Engineer, Volume 71, No 13, 1993
6. Charles W. Roeder, "Composite action in concrete filled tubes", Journal of Structural Engineer, 1999
7. AIJ standards for structural calculation of steel reinforced concrete structures. Architectural Institute of Japan, Tokyo, 1991
8. Y. Morishita, M. Tomil, K. Yoshimura, "Experimental studies on bond strength in concrete circular steel tubular columns subjected to axial loads", Trans. Japan Concrete Inst, Tokyo, 1, 351-358, 1979(a)
9. M. Tomil, K. Yoshimura, Y. Morishita, "A method of improving bond strength between steel tube and concrete core cast in circular steel tubular columns", Trans. Japan Concrete Inst, Tokyo, 1, 359-366, 1979(b)
10. Y. Morishita, M. Tomil, K. Yoshimura, "Experimental studies on bond strength in concrete filled square and octagonal steel tubular columns subjected to axial loads"
11. Masahide Tomii, Youichi Morishita, "Experimental

- studies on bond strength between square steel tube and encased core under cyclic shearing force and constant axial force", Trans. Japan Concrete Inst, Tokyo, 4, 351-358, 1979(a)
12. M. Tomil, K. Yoshimura, Y. Morishita, "A method of improving bond strength between steel tube and concrete core cast in square and octagonal steel tubular columns", Trans. Japan Concrete Inst, Tokyo, 2, 107-114, 1980(a)
13. M. Tomil, K. Yoshimura, Y. Morishita, "A method of improving bond strength between steel tube and concrete core cast in square and octagonal steel tubular columns", Trans. Japan Concrete Inst, Tokyo, 2, 99-106, 1980(b)
14. M. Tomii, "Bond check for concrete-filled steel tubular columns", Composite and mixed construction. ASCE, Reston, Va, 195-214, 1984
15. Cameron B, "Bond behavior in concrete filled tube composite columns" Ms thesis, University of Washington, Seattle, 1997