

중심축력을 받는 콘크리트 충전강관 기둥의 역학적 거동 특성에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties of Concrete Filled Steel Tube Column under Centric Axial Load

박정민* 김화중**

Park, Jeong Min Kim, Wha Jung

요 약

본 연구는 콘크리트 충전강관을 고층 건물의 구조부재로 이용하기 위한 연구의 일환으로서 강관의 폭두께비, 세장비와 충전 콘크리트의 강도를 주요 변수로 하여 강관이 콘크리트를 단순 구속하는 경우의 재하조건으로서 일련의 실험을 통하여 콘크리트 충전강관 기둥의 역학적인 거동 특성을 고찰하였다. 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 구속 콘크리트의 파괴양상은 단주의 경우 시험체 단부에서의 압괴에 의한 45° 정도의 사인장 파괴가 이루어졌으며 장주의 경우 횡방향 휨 파괴 양상을 나타내었다.

(2) 원형강관으로서 콘크리트를 구속함으로써 변형능력의 향상과 동시에 콘크리트의 연성 효과를 증대시킬 수 있었다.

(3) 강관의 세장비, 폭두께비, 콘크리트의 강도를 고려하여 콘크리트의 구속계수를 이용하여 강관에 의해 구속된 내부 콘크리트와 충전 강관 기둥의 최대내력 산정식을 제안하였다.

Abstract

This study investigated to the properties of structural behaviors through a series of experiment with the key parameter, such as diameter-to-thickness(D/t) ratio, slenderness ratio of steel tube and strength of concrete under loading condition simple confined concrete by steel tube as a fundamental study on adaptability with structural members in high-rise building. The obtained results are summarised as follow.

(1) The fracture mode of confined concrete was presented digonal tension fracture in the direction of 45° with compression failure at the end of specimen in stub column, but the fracture mode of long column was assumed an aspect of bending fracture transversely.

(2) The deformation capacity and ductility effect was increased by confine steel tube for concrete.

(3) The emprical formula to predict the ultimate capacity of confined concrete by steel tube and concrete filled steel tube column using restraint of concrete considered D/t ratio, slenderness ratio of steel tube and strength of concrete were proposed.

* 정회원, 경북대학교 건축공학과 박사과정

** 정회원, 경북대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 1996년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Keywords : concrete filled steel tube column, ultimate capacity, plastic deformation, superimposed strength, confined effect

1. 서 론

최근 건설 시장은 양적 팽창과 더불어 극심한 건축자재의 부족과 숙련공의 부족등 여러가지 제문제점들을 안고 있으며 또한 최근의 도시 구조물의 양상은 용지난의 부족과 도시 인구의 과밀화와 시설 집중화로 인해 고층화, 심층화 되어가고 있으며 또한 고층화 심층화에 따라 다양화, 다기능화, 복합화 되어가고 있다. 이러한 제문제점들과 건설 환경에 대한 대응방안으로서 재료의 고강도화, 고성능화 및 새로운 구조 설계 방식의 개발에 대한 관심과 의욕이 높아가고 있으며 연구 활동들이 활발히 행해지고 있다.^(1~10)

지금까지는 건물의 구조설계 및 시공에 있어서 주 구조부재로서 H형강이 주로 사용되어져 왔으나 H형강이 기둥부재로 사용되어질 경우 단면 성능에서 강축·약축의 구분이 있다는 단점으로 인해 가새나 전단벽등을 많이 사용하게 되었으며 이로 인해 평면 계획에서 많은 문제점을 나타내었다.

이러한 H형강의 문제점을 해결할 수 있는 방안으로써 등방성의 충전 강관 구조가 요즈음 수년동안 철골조 빌딩 건축에서 구조부재로 사용하는 예가 증가하고 있다.

강관내에 콘크리트를 충전한 강관 콘크리트 부재는 동단면의 비충전 강관 부재에 비해서 압축내력, 휨내력에 있어서 우수하고 특히 충전한 콘크리트에 의한 강성 기여, 응력 분담, 강관의 국부좌굴을 구속하는 보강효과에 의한 인성의 향상 등의 잇점이 기대된다고 할 수 있다.

따라서 부재 내력의 상승으로 인한 강성의 상승에 따라 거주성의 개선 및 저층부의 부재단면을 줄일수 있으므로 구조 설계의 자유도를 증대시킬 수 있다.⁽¹²⁾

또한 시공시 강관은 거푸집 역할을 함으로서 철근 거푸집 공사가 배제되어 인건비의 절감 및 공기의 단축이 가능하며 공장 생산화에 의한 품질

향상을 가져올 수 있다는 잇점외에 여러가지 제 관점에서 우수한 구조 형식이라 할 수 있다.⁽¹³⁾ 이러한 구조 특성상의 우수함에도 불구하고 일반 구조 형식으로 보편화되지 못하고 있는 이유로는 강관내에 채워지는 콘크리트의 품질 관리가 곤란하고 의문시 되어 왔기때문이다. 또한 소성 영역에 있어서 강관과 콘크리트의 응력 분담이 명확하게 되어 있지 않으며 강성 기여율, 강관 콘크리트 부재의 여러가지 제성상에 관해 충분히 파악되고 있지 않기 때문이다. 이러한 이유로 인해 구조골조의 설계에 있어서 현행의 제규준에서는 누가 내력식을 채용함과 아울러 폭두께비 제한은 강구조 설계기준에 따르는 것으로 하고 있다. 하지만 최근 국내·외적으로 많은 실험 및 이론적 연구가 행해지고 있으며 이러한 제문제점들은 조만간 극복되어 앞으로 충전형 강관 콘크리트 구조는 그 사용범위가 확대될 것으로 사료된다.

이에 본 연구는 이와 같은 관점에서 위의 연구성과들을 토대로 콘크리트 충전 강관 부재를 고층 구조물의 기둥 부재로서의 적용성을 위한 일련의 연구중 강관의 세장비(H/D비), 폭두께비 및 충전 콘크리트 강도를 복수 파라미터로 취하여 콘크리트 충전 원형강관 기둥의 좌굴내력 및 변형성상을 고찰하여 최대내력 산정식을 제시함으로써 구조설계에 있어서의 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다.

2. 실험 계획

2.1 시험체 계획

시험체는 기성 제품(P사)인 원형강관(SPS41)을 사용하였으며 표 1에 나타내는 바와 같이 강관의 세장비(H/D비), 폭두께비와 충전 콘크리트의 강도는 3종류로 하였으며 재하방법은 콘크리트면과 강관면의 동시재하로 하여 시험체의 수는 충전 강관 27개와 중공강관 9개로 총 36개의 시험체를

Table 1 The list of test specimens

Size(mm)		(D/t)	Radius of gyration(i)	Area A(cm ²)	L(cm)	Strength of Concrete	Loading Condition	Remark		
D	t							Specimens		
60.5	4.0	15.13	2.03	7.10	18.15	210kg/cm ² 300kg/cm ² 400kg/cm ²	Partial Loading (concrete plane)	A	N	X
76.3	4.0	19.08	2.56	9.085	22.89			D/t ratio	Strength of concrete	Selendemess ratio
89.1	4.0	22.28	3.01	8.636	26.73			D/t ratio : A : 15.13 B : 19.08 C : 22.28 Strength of concrete : N=Hollow, L=210, M=300, H=400 Selendemess ratio : X : λ=10 Y : λ=20 Z : λ=30		

제작 하였다. 시험체 일람을 표 1에 나타낸다.

2.2 실험 방법

시험체의 양단 구속조건은 구좌를 이용하여 단순재하로 하였다. 재하 방법은 U.T.M(200t)을 이용하여 중공강관의 경우 압축시 등분포 하중을 받도록 양단을 재속에 직각되도록 가공한 후 end plate를 용접 부착하였으며 콘크리트면 재하의 충전 강관 시험체의 경우 모재를 cutting하여 콘크리트를 강관면 위까지 충전한 후 28일 양생시킨 후 전기 절단기를 사용하여 강관면과 일치하도록 절단 하였다. 가력에 있어서는 그림 1에 나타내는 바와 같이 하였으며 시험체의 축변위, 횡변위, 각 변위를 측정하기 위해 시험체 상, 하단부 및 중앙부에 변위계를 설치하고 변형이 가장 큰 시험체 중앙부에 Wire Strain Gauge를 부착하여 중앙부의 변형도 분포를 측정 하였다. 그림 1에 실험 Set Up을 나타낸다.

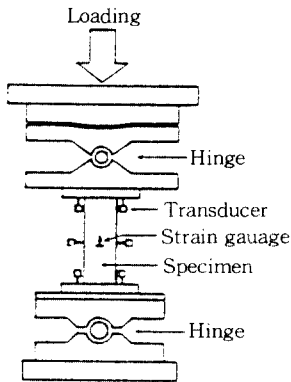


Fig. 1 The set up of experiment

3. 소재의 역학적 특성 시험

소재의 기계적 성질을 파악하기 위하여 강재에 대해서는 단주압축 실험을 행하였으며 콘크리트에 대해서는 각각의 강도별로 10Φ×20h의 공시체 9개씩을 제작하여 압축강도 실험을 행하였다.

3.1 강재의 STUB COLUMN TEST

제작과정에 따른 영향을 파악하기 위해 원형강관으로부터 시험편을 절취하여 stub column test를 행하였다. stub column 시험체는 부재 시험체와 같은 모재로서 잔류응력을 충분히 포함하고 압

Table 2 The result of stub column test

Size(mm)		σ_y	σ_{max}	σ_y / σ_{max}	E
D	t				
60.5	4.0	2.783	3.786	1.360	2015
76.3	4.0	3.189	4.245	1.331	2085
89.1	4.0	3.224	4.021	1.247	2110

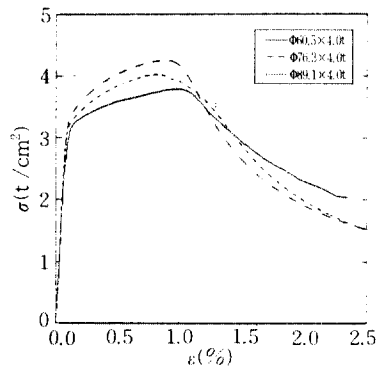


Fig. 2 The relationship of stress-strain by stub column test

측시 탄성역이나 소성역에서 좌굴하지 않도록 SSRC 추장에 따라 직경의 3배를 모재로부터 절취하여 양단부에 end plate를 용접 부착하였다. 실험은 UTM 200t을 사용하여 시험체 상하단부에 구좌를 설치하여 단순재하 하였다. stub column test 시험 결과를 표 2와 그림 2에 나타낸다.

3.2 충전 콘크리트의 압축강도 실험

콘크리트 충전 강관 기둥 압축시험체에 사용된 충전 콘크리트의 압축강도를 구하기 위해 KSF 2404의 규정에 따라 콘크리트 강도별로 10Φ×20h의 공시체 9개씩을 제작하여 압축강도 실험을 행하였다. 충전 콘크리트의 강도 평가에 있어서 압축강도는 9개의 공시체의 평균치의 표준편차에서 가장 벗어나는 3개의 시험체를 제외한 6개의 평균치를 압축강도로 하였다. 콘크리트의 배합표와 실험결과를 표 3에 나타내고 응력도-변형도 관계를 그림 3에 나타낸다.

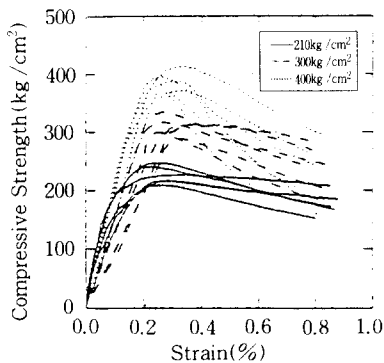


Fig. 3 The relationship of stress-strain of concrete

4. 콘크리트 충전강관 기둥의 실험 및 실험 결과

4.1 실험

본 연구는 콘크리트 충전강관 기둥에 대해 충전 콘크리트 강도, 세장비(H/D비), 폭두께비를 주요 변수로 하여 축압축 실험을 행하여 콘크리트 충전강관 기둥에 대한 종국내력 및 변형성상을 고찰하기 위한 것으로서 충전 강관 기둥에 대한 실험장면을 사진 1에 나타내며 실험결과를 표 4에 나타낸다.



Photo. 1 The scene of experiment for concrete filled steel tube column

4.2 실험결과

(1) 하중-축변위 관계

그림 4는 콘크리트 충전 강관 기둥의 최대하중 축방향 변위 곡선을 나타낸 것이다.

그림에서 살펴보면 대체적으로 세장비(H/D비)가 작을수록 콘크리트의 강도가 높을수록 초기 강성이 높고 콘크리트 강도가 동일한 경우 경두께비의 차이에 의한 초기 강성의 차이는 대체적으로 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 3 The proportion and experiment results of concrete

Design Strength (kg/cm ²)	The maximum size of coarse aggregate(cm)	Slump (cm)	Unit weight(kg/m ³)					The average compressive strength of concrete(kg/cm ²)	The average strain in maximum strength(%)
			Cement	Sand	Gravel	Water	High range water reducer		
210	13	12	334	896	963	176	2.5	226	0.26
300		12	429	685	1051	169	3.2	311	0.30
400		14	533	744	931	160	8.0	387	0.35

Table 4 The experiment results for concrete filled steel tube column

Size(mm)		D/t	Kind	λ	P_{max}			P_{max}/P_c			$P_{max}/P_c P_{sy}$			P_{max}/P_h		
D	t				210	300	400	210	300	400	210	300	400	210	300	400
60.5	4.0	15.13	filled	10	36.928	41.560	44.688	6.521	5.333	4.608	1.452	1.508	1.517	1.508	1.698	1.825
				20	31.576	35.816	39.376	5.576	4.600	4.060	1.242	1.299	1.337	1.394	1.581	1.738
				30	27.616	33.072	35.488	4.877	4.244	3.659	1.086	1.200	1.205	1.285	1.539	1.651
75.3	4.0	19.08		10	54.184	61.224	66.600	5.843	4.797	4.194	1.416	1.467	1.485	1.550	1.751	1.905
				20	46.816	53.880	58.114	5.048	4.222	3.660	1.224	1.291	1.296	1.475	1.698	1.831
				30	40.968	48.640	52.648	4.418	3.811	3.315	1.071	1.165	1.174	1.414	1.679	1.817
89.1	4.0	22.28		10	62.640	74.500	81.820	4.875	4.214	3.719	1.372	1.429	1.449	1.572	1.804	1.981
				20	58.320	63.296	70.184	4.539	3.580	3.190	1.169	1.214	1.243	1.491	1.706	1.892
				30	48.596	55.748	62.680	3.782	3.153	2.849	1.027	1.088	1.110	1.455	1.669	1.877

Where : P_{max} : ultimate strength of concrete filled steel tube column
 P_c : Compressive strength of concrete $P_c + P_{sy}$: Superimposed strength
 P_h : ultimate strength of hollow steel tube

한편 최대내력 이후의 저하 구배를 살펴 보면 경두께비에 관계 없이 대체적으로 H/D 비가 3 정도인 세장비 $\lambda=10$ 의 시험체는 최대 내력 이후의 저하구배가 완만하게 나타났으며 그러한 양상은 충전 콘크리트의 강도가 낮을수록 현저하게 나타났다.

또한 세장비 20, 30의 시험체는 대체적으로 최대내력 이후의 내력 저하가 급격하게 일어났으며 그러한 양상은 콘크리트의 강도가 높을수록 강관의 경두께비가 클수록 크게 나타났다.

(2) 하중 횡변위 관계

그림 5는 콘크리트 충전 강관 기둥의 최대하중 횡방향 변위 곡선을 나타낸 것이다.

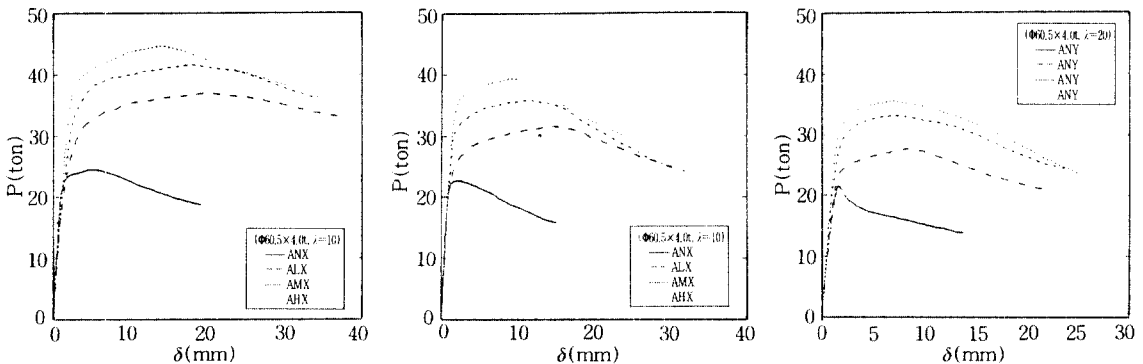
그림에서 살펴보면 압축 응력의 증가에 따라 횡방향의 변위 양상은 대체적으로 재하 초기 상태인 탄성역에서는 거의 일어나지 않았지만 항복하중 이후의 비탄성역에서는 횡방향 변위량이 점차적으로 증가하고 있다.

이러한 양상은 세장비가 클수록 충전 콘크리트의 강도가 높을수록 현저하며 최대내력 이후의 저하 구배도 급격하게 감소함을 알 수 있다. 한편 경두께비의 변화에 따른 횡방향 변위 양상은 축방향 변위 양상과 마찬가지로 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

(3) 파괴 양상

콘크리트 충전 강관 기둥에 대한 실험 결과 그 파괴 양상을 살펴 보면 단주에 속하는 H/D비가 3 정도의 세장비 $\lambda=10$ 범위의 시험체는 충전 콘크리트의 강도에 관계없이 대부분의 시험체가 압괴 현상에 의해 시험체 단부에서 외측으로 강관이 부풀어 올라 면의 좌굴이 발생하여 강관 내벽으로부터 콘크리트의 Slip 현상을 수반 45° 방향의 사인장 파괴 양상을 나타내었다. 그러한 양상은 충전 콘크리트의 강도가 높을수록 뚜렷하게 나타났다.

한편 H/D=6.6, H/D=10 정도의 세장비 λ



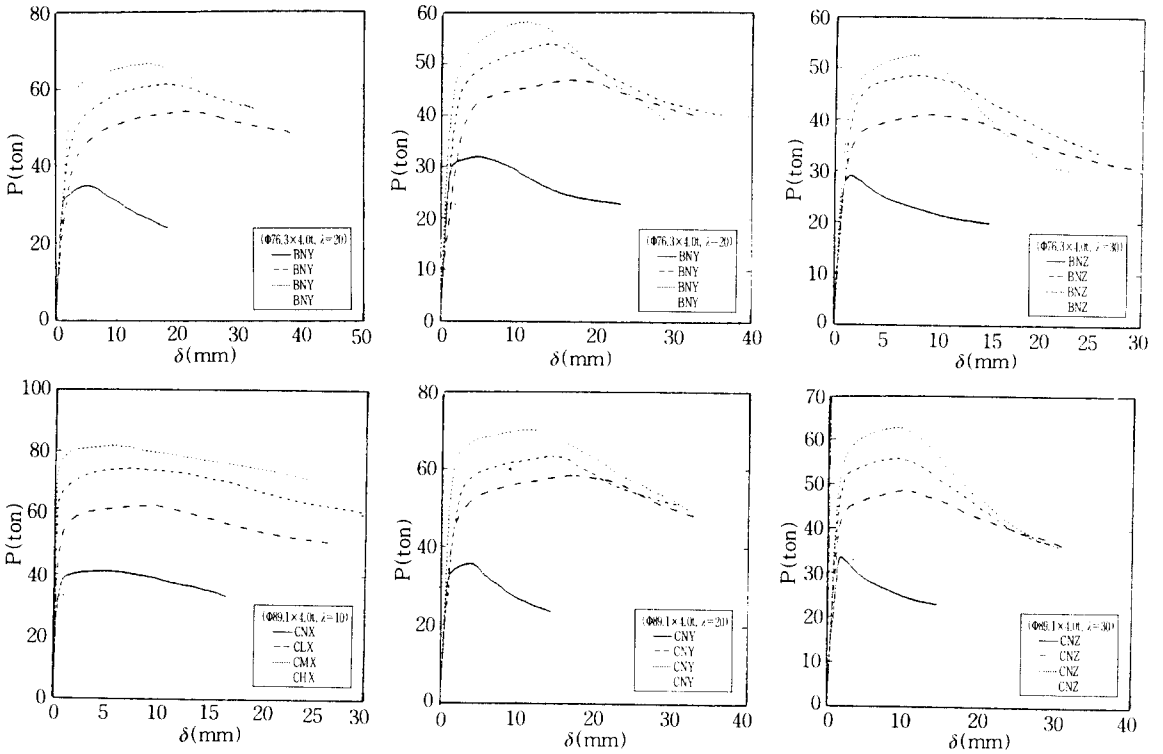
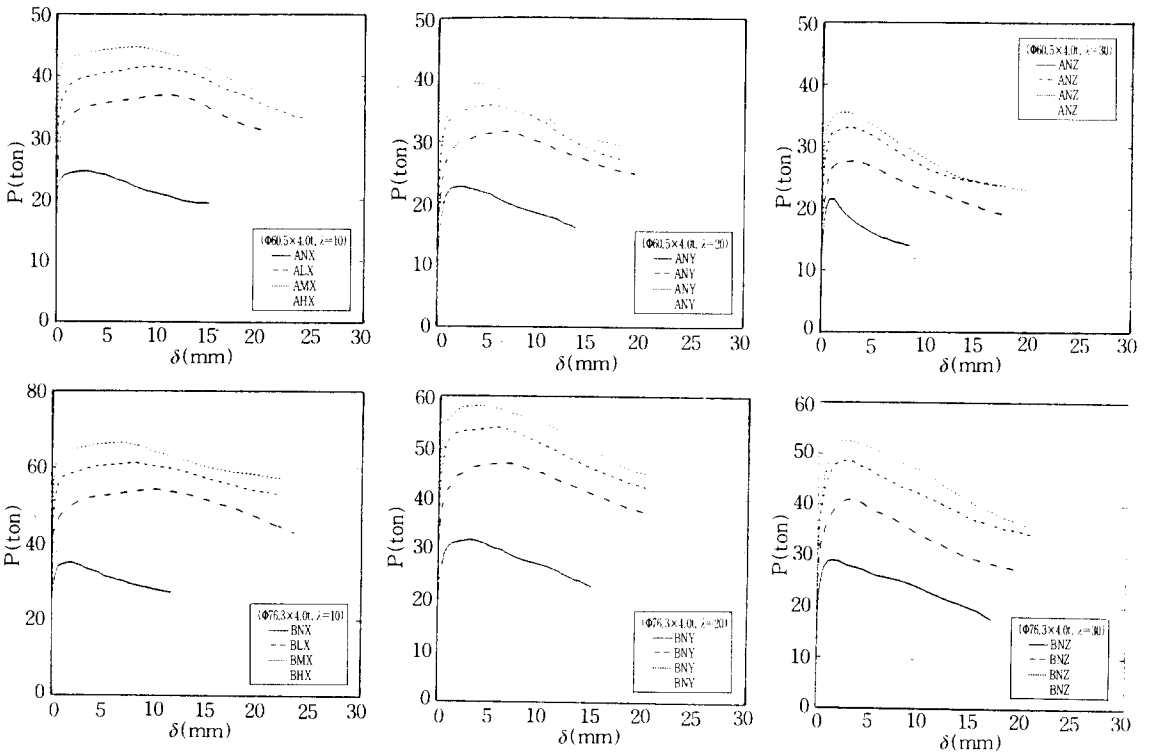


Fig. 4 The relationship of Load-Axial displacement



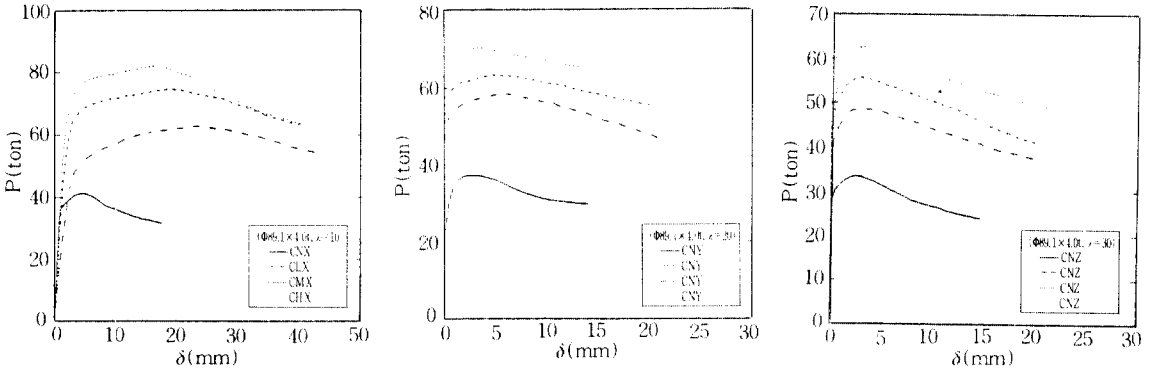


Fig. 5 The relationship of Load-transverse displacement

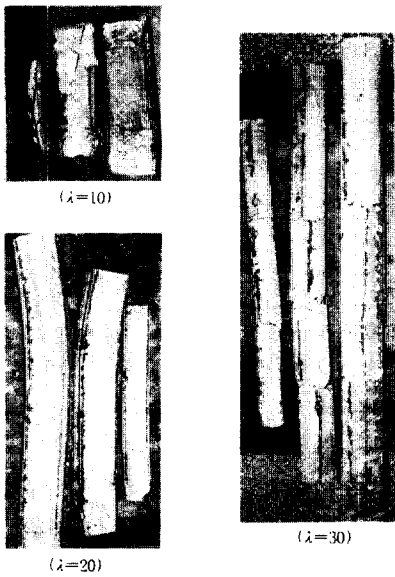


Photo. 2 The fracture mode of concrete

≈20, 30 정도의 시험체의 경우 대체적으로 사진 2에서 보는 바와 같이 대부분의 시험체가 강관 원주 방향으로의 휨 좌굴에 의한 부재 좌굴이 발생하여 종국 내력점을 나타내었다.

또한 세장비가 클수록 그 파괴 지점이 단부에서 중앙부로 이동하는 경향을 나타내었다.

사진 2에 강관으로 구속된 내부 콘크리트의 파괴 양상을 사진 3에 시험체의 파괴 양상을 나타낸다.

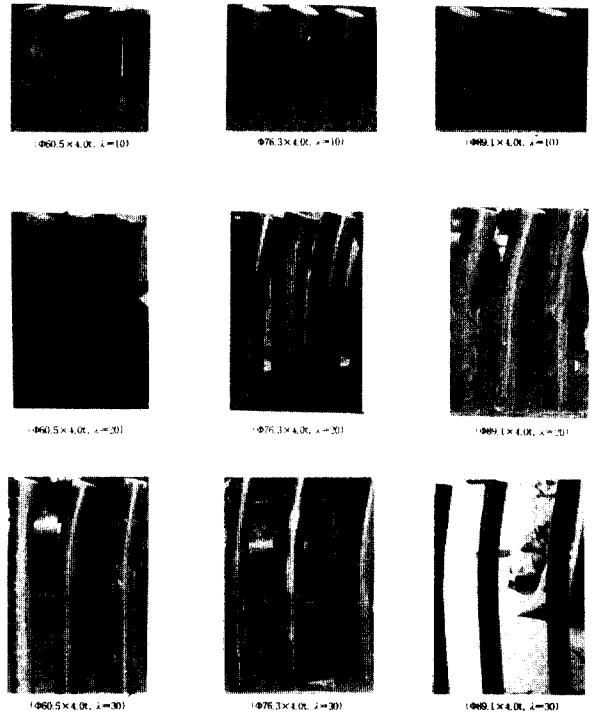


Photo. 3 The fracture mode of concrete filled steel tube column

5. 실험결과에 대한 고찰

5.1 구속효과에 대한 고찰

콘크리트 충전 강관 기둥의 구속 효과는 강관과 콘크리트의 상호 작용에 의한 두 이질재료의 포아송비의 차이에서 발생한다고 할 수 있으며 강관과 콘크리트가 탄성 상태인 경우 강관의 포아송비는 0.3 정도, 충전된 콘크리트의 포아송비는 0.15~0.25 정도로서 충전된 콘크리트는 강관에 의한 구속

효과가 없는 것으로 생각할 수 있으며 비탄성 상태인 경우 충전 콘크리트의 포아송비는 0.3~0.8 까지 증가하므로 구속효과를 발휘한다고 생각해 볼 수 있다.

본 연구에 있어서는 충전 강관 기둥의 구속효과를 고찰하기 위해 비충전 강관 기둥의 최대 내력시의 포아송비와 충전 강관의 포아송비를 세장비와 충전 콘크리트의 강도 변화에 따라 비교 고찰하여 구속효과를 살펴 본다.

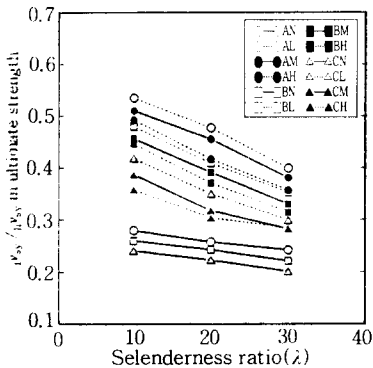


Fig. 6 The comparison of Possion's ratio of Hollow steel tube/ Concrete filled steel tube in maximum strength

그림 6에 나타난 바와 같이 대체적으로 비충전 강관의 최대내력시의 포아송비를 살펴보면 0.2~0.28 정도의 범위이고 충전 강관의 경우 0.28~0.54 정도로 나타나고 있다.

H/D비가 3인 비교적 단주에 속하는 시험체는 0.36~0.54 정도로서 비충전 강관에 비해 1.5~1.9 배 정도로 포아송비는 크게 나타나고 있으며 충분한 구속효과를 가져오는 것으로 사료되며 그러한 양상은 충전 콘크리트의 강도와 경두께비가 적을 수록 크게 나타나고 있다.

한편, H/D비가 6.6, 10 정도로 비교적 장주에 속하는 세장비 $\lambda=20, 30$ 의 시험체는 비충전 강관에 비하면 최대내력시의 포아송비가 크지만 그 값은 0.28~0.40 정도로 구속효과를 크게 기대할 수는 없는 것으로 사료된다.

5.2 변형능력에 대한 고찰

(1) 소성변형 능력의 평가

그림 7은 세장비와 폭두께비의 변화에 따라 비충전강관과 콘크리트 충전 강관의 변형능력을 대비시켜 나타난 것이다. 소성변형 능력은 부재실험에 의해 정해지는 최대내력시의 변형도 ϵ_{max} 을 항복내력시의 변형도 ϵ_y 로 나눈 값을 소성변형율 $\bar{\epsilon}$ 로 정의하여 비충전강관의 변형능력에 대비시켜 각각의 강도별에 있어서 세장비와 폭두께비의 변화에 따른 소성변형능력을 고찰하였다.

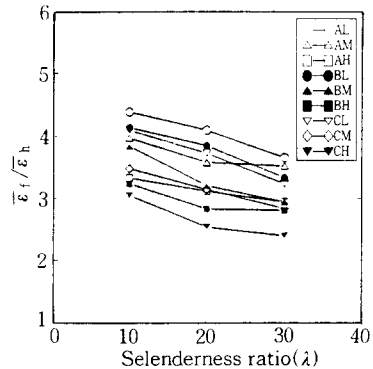


Fig. 7 The comparison of plastic deformation capacity of concrete filled steel tube/ hollow steel tube

그림에서 알수 있는 바와 같이 H/D 비가 3 정도인 세장비 $\lambda=10$ 인 시험체는 폭두께비에 관계없이 대체적으로 충전 강관 콘크리트기둥이 비충전 강관 기둥에 비해 소성변형능력은 매우 크게 발휘되고 있으며 비충전강관의 경우보다 1.2~2.2배 정도의 범위까지 증가하였다. 변형능력의 증가 양상을 보면 대체적으로 콘크리트의 강도가 낮을수록 폭두께비가 적을수록 그 증가양상은 크게 나타났다.

그리고 H/D 비가 6.6, 10 정도의 세장비 $\lambda=20, 30$ 인 시험체도 대체적으로 폭두께비와 충전 콘크리트의 강도에 관계없이 비충전 강관 기둥에 비해 높게 나타나고 있으나 그 증가율은 세장비 $\lambda=10$ 에 비해 감소하고 있다.

한편 충전강관 기둥의 변형능력을 횡방향 구속이 없는 콘크리트 실린더의 변형능력과 비교해 보면 콘크리트 실린더의 최대내력시의 변형율 0.26~0.35%의 경우보다 약 2~5배 정도 변형능력을 발휘할 수 있으며 그러한 증가율은 세장비가

적은 단주로 갈수록 크게 나타나고 있다. 따라서 순수 콘크리트에 비해 상당한 연성의 증가를 가져올 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 소성 변형능력 평가식의 제안

본 절에서는 콘크리트 충전 강관 기둥에 대한 실험결과를 토대로 세장비와 경두께비를 변수로 하여 콘크리트 강도별 충전 강관 기둥의 소성 변형능력을 산정할 수 있는 식을 아래와 같이 제안한다.

$$\bar{\epsilon} = -5.752\bar{\lambda} - 52.673\bar{\lambda} + 31.883$$

(R=0.942) (콘크리트강도 : 210kg/cm³)

$$\bar{\epsilon} = -7.760\bar{\lambda} - 45.705\bar{\lambda} + 29.921$$

(R=0.953) (콘크리트강도 : 300kg/cm³)

$$\bar{\epsilon} = -6.415\bar{\lambda} - 37.755\bar{\lambda} + 25.076$$

(R=0.969) (콘크리트강도 : 400kg/cm³)

표 5에 나타난 바와 같이 위의 제안식을 사용하여 소성 변형능력에 대해 산정한 결과와 실험 결과를 비교해 보면 경두께비와 세장비의 변화에 따라 약간의 오차는 있지만 대체적으로 양호한 근사치를 주고 있으며 실험결과/산정 결과의 비는 0.88~1.17 정도로 나타났다.

Table 5 The comparison of plastic deformation of experiment results for regression results

Kind	λ	210		300		400		εe / εr		
		εe	εr	εe	εr	εe	εr	210	300	400
15.13	10	24.24	21.58	21.05	19.19	17.37	16.20	1.123	1.050	1.072
	20	13.37	15.00	12.07	13.48	10.5	11.49	0.891	0.896	0.875
	30	7.53	8.41	7.29	7.76	6.08	6.77	0.895	0.939	0.899
19.08	10	20.15	21.04	18.71	18.44	15.80	15.59	0.958	1.015	1.014
	20	15.06	14.47	12.55	12.75	11.07	10.88	1.041	0.984	1.017
	30	7.94	7.91	7.02	7.06	6.69	6.18	1.003	0.995	1.082
22.28	10	18.04	20.32	15.87	17.48	13.88	14.79	0.917	0.908	0.939
	20	14.59	13.76	12.33	11.79	9.94	10.09	1.060	1.046	0.985
	30	8.17	7.20	7.14	6.10	6.04	5.39	1.134	1.172	1.122

Where : εe : experiment results
εr : resression results

5.3 최대내력에 대한 고찰

본 절에서는 콘크리트 충전강관 기둥의 실험결과를 토대로 하여 각각의 항목별로 충전강관 기둥의 최대 내력을 고찰한다.

(1) 세장비와 폭두께비의 변화에 따른 최대 내력의 비교

그림 8은 세장비와 폭두께비의 변화에 따른 각각의 충전 콘크리트 강도별 최대내력을 중공강관에 대비시켜 나타낸 것이며 그림 9는 순수 콘크리트와 충전강관과의 최대내력비를 대비시켜 나타낸 것이다.

먼저 세장비와 폭두께비의 변화에 따른 비충전 강관 기둥에 대한 충전 콘크리트 강관기둥의 좌굴 내력(P_f/P_n) 비를 살펴보면 대체적으로 경두께비와 콘크리트의 강도가 높을수록 세장비가 작은 단주일수록 비충전강관에 비해 최대내력 상승율은 높게 나타났다. 그러한 증가비율은 약 1.23~1.98

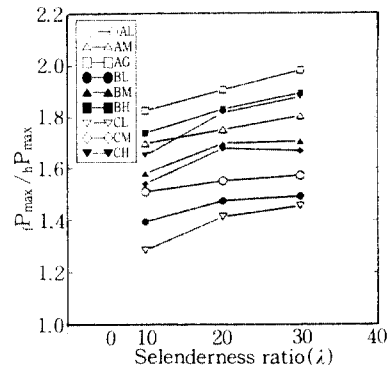


Fig. 8 The ratio of maximum strength of concrete filled steel tube/ hollow steel tube

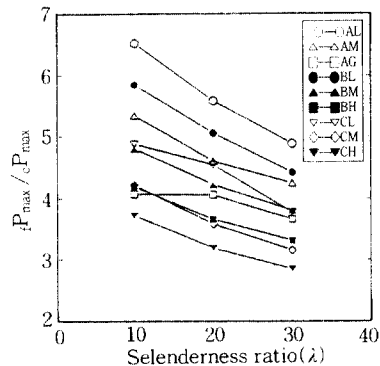


Fig. 9 The ratio of maximum strength of concrete filled steel tube/ Concrete

배 정도 높게 나타났다.

한편 좌굴실험 결과로부터 충전 강관기동에 대한 콘크리트의 최대내력비(P_{max}/P_c)를 살펴보면 세장비, 폭두께비 및 충전 콘크리트의 강도가 증가할수록 그 비율은 감소하고 있으며 대체적으로 그 비율은 2.49~6.52 배 정도 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 실험 결과로부터 강관내에 콘크리트를 충전한 충전강관을 기동부재로 사용할 경우 좌굴내력 면에서 아주 우수할 것으로 판단된다.

(2) 단순누가 강도식과의 비교

그림 10은 충전강관 기동에 대한 좌굴실험 결과와 단순누가한 결과를 콘크리트 강도별로 대비시켜 나타낸 것이다.

최대내력의 평가에 있어서 단순누가 내력은 콘크리트의 최대내력($P_c = A_c \cdot F_c$)과 강관의 항복내력($P_{sy} = A_s \cdot \sigma_y$)의 누가 강도를 P_0 로 정의 하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 $H/D=3$ 정도인 세장비 $\lambda=10$ 시험체의 경우 대체적으로 폭두께비가 적을수록 콘크리트의 강도가 높을수록 실험내력/누가내력의 비는 높게 나타났으며 그 값은 1.3~1.4 정도로 나타났다.

$H/D=6.6, 10$ 정도의 세장비 $\lambda=20, 30$ 의 경우도 세장비 $\lambda=10$ 인 시험체와 비슷한 양상을 나타냈지만 그 내력비는 세장비 $\lambda=20$ 의 경우 1.17~1.34 정도를 세장비 $\lambda=30$ 의 경우 1.03~1.21 정도로 나타났다. 위의 결과를 토대로 미루어 볼 때 콘크리트 충전강관주의 최대내력 산정에 있어서 대체적으로 세장비 $\lambda=20$ 이하인 비교적 단주 영역에

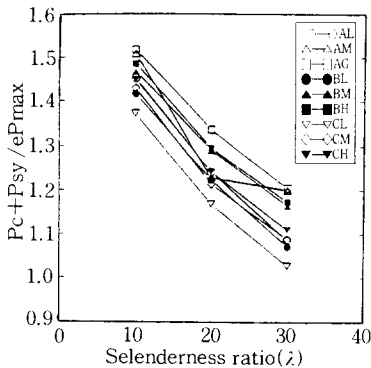


Fig. 10 The comparison of ultimate strength of experiment results/ superimposed strength

속하는 시험체의 경우 실험결과는 누가강도값 이상의 값을 나타내고 있으므로 단순누가 내력식으로 최대내력을 산정하기에는 무리가 있다고 할 수 있으나 안전측의 값을 주기 때문에 별문제가 없지만 $H/D=10$ 정도의 세장비 $\lambda=30$ 이상의 장주인 경우에는 경두께비와 세장비가 증가할수록 그 내력비가 감소하는 경향을 보이므로 단순누가 내력으로서 최대내력을 평가하기는 무리가 따르므로 충전 강관기동의 최대내력을 산정할 수 있는 적절한 식이 필요한 것으로 생각된다.

5.4 콘크리트 충전강관 기동의 최대 내력 평가식의 제안

콘크리트 충전 강관 기동에 있어서 충전 콘크리트가 강관에 의해 구속되어 있는 경우 구속된 콘크리트는 횡방향으로 구속력을 받게 되므로 콘크리트는 3축 응력 상태가 되며 강관은 2축 응력 상태로 되어 충전 강관의 최대내력은 3축 압축력을 받는 최대내력과 강관과 콘크리트의 부착력의 합으로서 나타낼 수 있다.

$$P = P_c + P_s \quad (1)$$

여기서 :

$$P_c = A_c(\sigma_1) \quad P_s = \sigma_{tb}A_s$$

P : 충전 강관의 최대 압축강도

σ_1 : 3축 압축 콘크리트 최대 강도($F_c + K\sigma_r$)

σ_{tb} : 강관과 콘크리트 부착 응력($10.3\text{kg}/\text{cm}^2$)

F_c : 콘크리트 실린더 강도

K : 구속 계수(2.45~6.0)

σ_r : 횡방향 구속응력

콘크리트 체적 팽창으로 인한 강관의 횡방향 구속응력은 (2) 식과 같다.

$$\sigma_r = D/t \times s_{\sigma\theta} \quad (2)$$

(2) 식을 (1) 식에 대입하여 정리 하면 (3)식과 같다.

$$P = A_c F_c + A_c K \cdot D/t \cdot s_{\sigma\theta} + \sigma_{tb} A_s \quad (3)$$

(3) 식에서 (D/t) 는 $A_c / (2A_c)$ 로 정의되고 식 (3)에 대입하여 정리하면 (4)식과 같이 된다.

$$P = A_c F_c + K / 2 \cdot A_s \cdot \sigma_{\theta} + \sigma_{sl} A_{s1} \quad (4)$$

(4) 식에서 강관은 부착에 의한 축방향력과 횡방향 인장응력을 동시에 받는 2축 응력 상태로 되므로 2차원 응력 문제에서 최대 전단 응력 이론을 적용하여 강관이 중국 내력에 달하는 경우

$$(\sigma_{\theta} + \sigma_{sl}) / 2 = \sigma_y \quad (5)$$

식 (5)를 (4)에 대입하여 정리하면 (6)식과 같이 충전 강관 기둥의 중국내력 산정식을 정의할 수 있다.

$$P = A_c F_c + K / 2 A_s (\sigma_{\theta} + \sigma_{sl}) / 2 + \sigma_{sl} A_{s1} \quad (6)$$

한편, 충전 강관 기둥의 파괴 양상을 살펴 보면 2가지 양상으로 생각해 볼 수 있는데 먼저 콘크리트가 압괴에 의해 완전 파괴되어 횡방향으로 부풀어 오르며 중국 내력에 달하는 경우(단주의 경우)와 국부 좌굴이나 횡방향 휨으로 인한 파괴 양상(장주의 경우)을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 실험에서 살펴본 바와 같이 위의 식을 사용할 경우 강관의 횡방향 휨의 영향이 없는 단주의 경우에는 별 무리가 없는 것으로 사료되지만 비교적 장주에 속하는 경우는 부재의 휨에 대한 영향으로 위의 식으로 중국내력을 평가하기에는 무리가 따른다 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 강관의 세장비와 경두께비 및 충전 콘크리트의 강도를 고려하여 콘크리트의 구속 계수를 이용하여 구속 콘크리트의 최대내력을 구하고 강관의 항복 내력과 누가하여 충전 강관 콘크리트 기둥의 내력을 산정할 수 있는 실험식을 아래와 같이 제안한다.

$${}_c P_u = 1.727 P_c + (0.783\bar{\alpha} - 6.712\bar{\lambda}) \cdot v_{sy} P_{sy} + 9.566 \quad (7)$$

$${}_r P_{max} = {}_c P_u + P_{sy} (R = 0.947) \quad (8)$$

여기서 : ${}_c P_u$: 구속 콘크리트 최대내력

P_c : 콘크리트 실린더 강도

$\bar{\alpha}$: 무차원 경두께비

$\bar{\lambda}$: 무차원 세장비

v_{sy} : 강관의 포아송비

P_{sy} : 강관의 항복 응력

표 6은 위의 식을 사용하여 회귀한 결과와 실험 결과를 비교해 본 결과 대체적으로 양호한 근사를 이루고 있으며 실험내력 / 회귀 내력의 비는 대체적으로 0.96~1.08 정도의 값을 나타 내었다.

Table 6 The comparison of experiment results and regression results of ultimate strength of concrete filled steel tube column

Kind	210	300	400	Pe / Pr	
15.13	10	36.92837.20541.56040.88544.68844.176	0.993	1.017	1.012
	20	31.57632.40135.81636.08039.37639.371	0.975	0.993	1.000
	30	27.61627.59333.07231.27335.48834.563	1.001	1.058	1.027
19.08	10	54.18452.52161.22458.54766.60063.933	1.032	1.046	1.042
	20	46.81645.73753.88051.76358.11457.149	1.024	1.041	1.017
	30	40.96838.95848.64044.98452.64850.370	1.052	1.081	1.045
22.28	10	62.64064.79774.50073.14481.82080.609	0.967	1.019	1.015
	20	58.32057.02163.29665.36870.18472.833	1.023	0.968	0.964
	30	48.59649.24555.74857.39262.68065.057	0.987	0.970	0.964

Where : Pe : experiment results

Pr : ressession results

6. 결 론

본 연구는 중심 축압을 받는 충전강관 기둥에 대해 강관의 폭두께비와 세장비, 충전 콘크리트의 강도를 복수 파라미터로 취하여 좌굴 내력 및 변형성상에 대해 고찰한 것으로서 일련의 실험을 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 원형 강관으로 구속된 내부 콘크리트의 파괴 양상은 H/D비가 3 정도의 단주인 경우 시험체 단부에서 압괴 현상이 발생하여 45°방향의 사인상 파괴를 나타냈으며 장주의 경우 원주 방향의 휨 파괴 양상을 나타내었다.

(2) 원형 강관내에 콘크리트를 충전 시킴으로써 비충전 강관에 비해 변형능력을 3~4배 정도 순수 콘크리트에 비해 4~6배 정도 향상 시킬수 있으며 콘크리트의 연성 효과를 기대할 수 있다.

(3) 강관내에 콘크리트를 충전함으로써 비충전 강관에 비해 중국내력을 1.3~2.0배 정도 내력을 향상 시킬수 있으며 그러한 효과는 경두께비와 충전 콘크리트의 강도가 높을수록 H/D비가 적은 단주일수록 효과적임을 알았다.

(4) 단순 누가 내력으로 충전 강관 기둥의 최대 내력을 산정할 경우 단주일 때는 안전측의 값을 주지만 장주일 경우 과대 평가 되므로 세장비의 변화에 따른 최대내력 산정식이 필요하다.

(5) 강관의 경두께비와 세장비, 충전 콘크리트의 강도를 고려한 구속계수를 이용 구속 콘크리트의 내력을 구한 후 강관의 항복 응력과의 누가 내력으로서 충전 강관 기둥의 내력 산정식을 다음과 같이 제안한다.

$$cP_u = 1.727P_c + (0.783\bar{\alpha} - 6.712\lambda) \cdot v_{sy} P_{sy} + 9.566$$

$$fP_{max} = cP_u + P_{sy} (R=0.947)$$

참 고 문 헌

1. Furlong, R. W : Design of Steel-Encased concrete Beam-Column, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 94, No ST1, Jan, 1968, pp. 267-281
2. Gardner, N. J & Jacobson, R : Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tube, ACI, Vol. 65, No 1, Jan, 1968, pp. 66-69
3. Knowles, R. B & Park, R : Strength of Concrete Filled Steel Tubular Column, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95, No ST12, Dec, 1969, pp. 2565-2587
4. K. S. Viridi & P. J. Dowling : Bond Strength in Concrete Filled Steel Tubes, IABSE, No 33/80, Mar, pp. 125-139
5. N. J. Gardner & R. Jacobson : Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tube, ACI, 1967, July, pp. 404-412
6. Fafitis, A & Shah, S. P : Predictions of Ultimate Behavior of Confined Column Subjected to Large Deformations, ACI, No 82-35, July, 1985, pp. 423-433
7. Lloyd, C. P. Yam, "Design of Composite Steel-Concrete Structure", Surrey University Press, 1988
8. 林 信之 外 3人 : 高強度材料を用いたコンクリート充てん角形鋼管柱の軸壓縮性狀, 콘크리트工學年次報告集, Vol 15, No 2, 1993, pp. 977-982
9. 共上哲郎 外 2人 : 콘크리트 충전角形鋼管部

材における鋼管とコンクリートコアの共働效果, 콘크리트工學論文, No 79, 9-2, pp. 10-18

10. 松井千秋 外1人 : 콘크리트 충전 콘크리트의 효과와考慮した角形鋼官의 幅厚比制限について, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1981, 10, pp. 2125~2126
11. 崎野建治 外1人 : 콘크리트 충전角形鋼官柱의 終局強度に關する研究, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1981, 9, pp. 2127~2128
12. 澤田誠一郎 外6人 : 콘크리트 충전鋼官柱의 超高層建物への利用についての實驗的研究(その3 軸壓力を受ける円形鋼管 콘크리트 柱의 彈塑性性狀), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1987, 10, pp. 1267~1268
13. 計 良 光一郎 外2人 : 콘크리트 충전鋼官柱의 荷重傳達に關する研究(その1: 鉛直荷重의 傳達), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1987, 10, pp. 1287~1288
14. 下戶芳實 外5人 : 안보ンド型 충전鋼管 콘크리트 構造에 關する研究(その2: 보ンド型 と比較した中心壓縮實驗), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1986, 8, pp. 1419~1420
15. 中島秀雄 外5人 : 안보ンド型 충전鋼管 콘크리트 構造에 關する研究(その3: 諸條件에 關する中心壓縮實驗), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1986, 8, pp. 1421~1422
16. 鈴木 外 2人 : 콘크리트 충전角形鋼官柱의 彈塑性性狀について, 日本建築學會論文集, 1984, 11, 第345號, pp. 70-77
17. 遠藤 創 外3人 : 콘크리트 충전鋼官短柱의 軸壓縮耐力特性と耐力評價法, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1994, 9, pp. 1561~1562
18. 吉富 雄紀 外2人 : 콘크리트를充てんした角形鋼管의 應力-ひずみ關係에 關する實驗的研究, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1994, 9, pp. 1573~1574
19. 김동규 외 2인 : 콘크리트 충전 각형 강관의 국부 좌굴 보강 효과 및 폭두께비 제한에 관한 실험적 연구, 대한 건축학회 학술발표 논문집, 제 6권 제 1호, 1986, 4, pp. 389-392
20. 김규석 외 2인 : 충전 콘크리트 강관 Stub-Column 구조 특성에 관한 연구, 대한 건축학회 학술발표 논문집, 제 13권 제 2호, 1993, 10, pp. 537-542

(접수일자 : 1995. 7. 22)