

실험 및 데이터 분석에 의한 CFCT 단주 특성

Characteristics of Concrete Filled Circular Tubular Stub Columns based on
Experiment and Data Analysis

강 현 식*

Kang, Hyun-Sik

Abstract

The use of composite members to improve the compressive strength of steel structure is a common practice these days and its efficiency has already been proved by several researches and experiments.

The result of concrete filled circular tubular(CFCT) stub column tests is introduced in this paper. The main parameter of this test is the ratio of diameter to thickness of circular hollow section. From the test results, the effect of concrete filled in steel tube on the ultimate strength, the deformation capacity and initial stiffness are discussed.

The purpose of this paper is to investigate the effect of various parameters and evaluate the compressive strength of confined concrete. It would contribute to a better understanding of CFT structure, further laboratory experimentations are needed for better accurate estimation on its effect.

keywords : CFCT Stub Column, Confinement Effect, Diameter to Thickness Ratio, Compressive Strength of Confined Concrete

1. 서 론

최근 국내에서도 많은 초대형 고층건물이 세워짐에 따라 건축물은 연직 하중뿐만 아니라 수평 하중이 건축구조계획에서 매우 중요한 요인이 되고 있다.

건축구조분야의 고층화는 새로운 구조 시스템과 재래 공법의 개선을 가져왔는데 이중 하나가 합성구조시

스템(Composite Structural System)이다. 특히 합성 구조에는 충전 형식, 피복 형식, 충전피복 형식등이 있으며, 이중 콘크리트충전 강관 기둥에 대한 연구는 1901년 Swell의 실험 연구이후 1961년 일본의 仲威雄은 압축실험 및 해석결과를 발표한 바 있다. 그 후 ACI-63에 콘크리트충전 강관 기둥에 대한 규준서를 제시하게 되었고, 1970년 CIDECT(Comite International

* 정회원, 전주사범대 건축학과 전임강사, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의물 2001년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2001년 6월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

pour le Developement et l'Etude de la Construction Tubulaire)에서는 다양한 크기의 원형 및 각형 CFT 기둥에 대한 설계 자료⁽¹⁾를 발간하였다.

국내에서는 1980년 강관 기둥에 대한 대학에서의 연구이후, 1990년경부터는 충전형 강관 기둥 부재(단주, 장주)특성, 기둥-보 접합부 개발 그리고 내화 성능 평가 등의 연구가 이어져 오고 있지만 아직은 외국의 연구와 비교해서 그 실적은 미진한 상태이다.

내력과 변형능력의 우수성과 1시간에서 2시간의내화 성능을 만족하는 연구 결과가 발표됨에 따라 이를 사용한 건축물이 보급되어가고 있는 추세이며 1995년 국내에서는 최초로 시공된 사례도 있다. 이질 재료의 합성이라는 재료적 특성으로 강관과 콘크리트의 강도 조합에 따라 충전 효과가 다르게 나타나고 지름-두께비가 주요한 변수가 된다. 따라서 본 연구는 단주 실험을 통해 콘크리트 충전효과가 초기강성, 최대 변형도 그리고 내력에 미치는 영향을 알아보고 국내·외 연구 결과를 토대로 강관의 항복 응력도, 콘크리트의 압축 강도 그리고 지름-두께비의 조합에 따른 상관 관계를 분석하여 규준 제정의 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 강제 인장강도 시험

시험체는 SS400급의 냉간성형 원형 강관 ϕ -76.3 \times 2.4(CT-1), ϕ -88.5 \times 2.4(CT-2), ϕ -101.6 \times 4.0(CT-3), ϕ -101.6 \times 4.2(CT-4)의 4종류로 하여 지름-두께비(D/t)가 24~37의 범위로 하고 강재의 기계적 성질을 파악하기 위한 인장강도 시험을 KS B 0801 14B호 시험편을 3개씩 제작하여 KS B 0802

Table 1 인장강도시험 결과

시험체	σ_y (t/cm ²)	σ_n (t/cm ²)	σ_y/σ_n	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	Elo. (%)
TC-1	3.21	3.71	0.83	1465	20.0
TC-2	3.16	3.67	0.89	1443	32.2
TC-3	3.51	4.04	0.79	1592	40.4
TC-4	3.71	4.28	0.87	1768	35.4

σ_y : 항복 응력도 σ_n : 인장 강도 σ_y/σ_n : 항복비
 ϵ_y : 항복 변형도 Elo. : 연신율

시험 방법으로 실시하였고 그 결과는 Table 1 및 Fig. 1과 같다. 항복붕이 잘 나타나지 않은 시험체의 경우에는 0.2% off-set법을 이용하여 항복응력도를 구하였다.

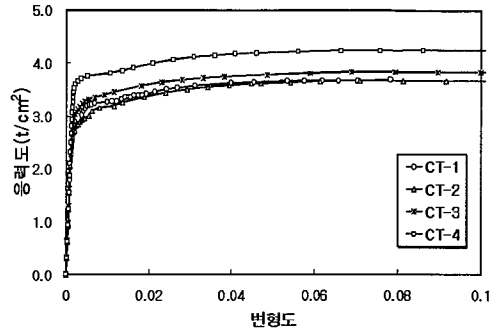


Fig. 1 강제 인장강도 시험 결과

2.2 콘크리트 압축강도 시험

콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 KS F 2403규정에서 정하고 있는 직경 10cm, 높이 20cm의 원주형으로 하였으며 28일 압축강도시험을 실시하고 평균치로 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2 콘크리트 압축강도 시험결과

f'_c (kg/cm ²)	ϵ_c (%)	E_c (t/cm ²)	Slump (cm)
150	0.2	180	12.4

f'_c : 압축강도 ϵ_c : 최대 압축 강도시 변형도

2.2 단주 압축 시험

냉간가공강관은 제작 과정에 있어서 용접 및 소성 가공에 의하여 단면내에 잔류 응력이 존재하게 된다. 단주압축시험은 이와 같은 영향을 파악하고 축압에 대한 전체적인 거동을 파악하기 위해 실시한다. 시험체 길이는 시들의 3배로 계획하였으나 SPS400급 원형 강관 CE(F)-1(ϕ -76.3 \times 2.4, D/t=32), CE(F)-2(ϕ -88.5 \times 2.4, D/t=37), CE(F)-3(ϕ -101.6 \times 4.0, D/t=25), CE(F)-4(ϕ -101.6 \times 4.2, D/t=24)의 4종류에 대해 충전 및 비충전 각 2개씩 총 16개를 제작한다.

시험체 형상 및 측정위치는 Photo 1에서 보는바와 같고, 가력은 100톤급 유압식 만능 시험기로 중심 압축이 되도록 하였으며 일정 가력 후 부착된 변형도 게이지의 값을 확인한 후 초기치를 잡고 본 실험을 실시하였다.

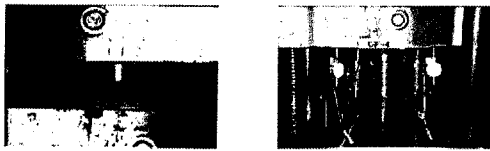


Photo 1 인장강도시험 및 단수압축시험

변형도 측정은 시험체 중앙부 4면에 길이 방향 1축 변형도 게이지를 부착하였고 축변위를 측정하기 위한 50mm L.V.D.T.를 대각 방향으로 모서리 부분에 4개 설치하여 그 평균치를 변위량으로 하였다.

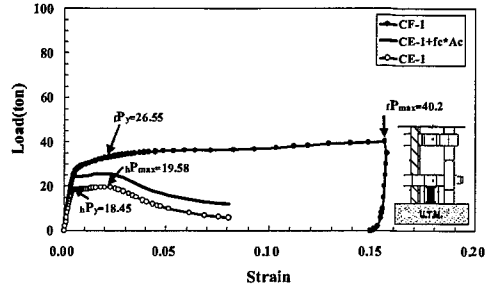
Table 3은 항복 응력도, 항복 하중, 항복 변위, 최대 내력, 최대 변위 그리고 파괴 모드별로 정리하여 나타낸 것이다. 여기서, 항복 하중과 항복 변위는 초기 접선의 1/3되는 선분과의 교점으로 정하였다.

Table 3 단수 시험 결과

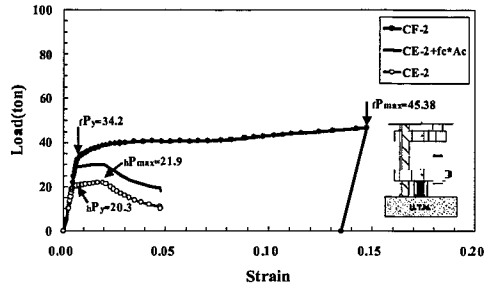
시험체	σ_y (t/cm ²)	eP_y (ton)	$e\delta_y$ (mm)	eP_{max} (ton)	$e\delta_{max}$ (mm)	파괴모드
CE-1	3.33	18.45	1.11	19.58	3.85	모드1
CF-1		26.55	1.03	40.20	29.80	모드2
CE-2	3.08	20.30	1.31	21.90	3.70	모드1
CF-2		34.20	1.95	45.38	32.46	모드2
CE-3	3.28	41.25	2.54	49.20	10.26	모드1
CF-3		57.50	1.83	73.20	27.18	모드2
CE-4	3.51	45.05	2.26	53.60	7.87	모드1
CF-4		62.00	1.78	80.60	28.45	모드2

CE : 비충진 원형 단주 CF : 충전 원형 단주
 eP_y : 시험체 항복 하중 eP_{max} : 시험체 최대 내력
 $e\delta_y$: 항복하중시 변위 $e\delta_{max}$: 최대내력시 변위
 K_1 : 초기 강성

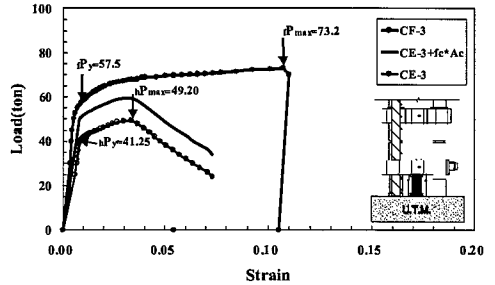
Fig. 2는 하중-축방향 변형도 관계 그래프로서 ○은 비충진 강관을 나타내며, □은 실선은 비충진 강관과 콘크리트의 분단력($f_c \cdot A_c$)을 단순히 더한 것이다. ● 표시된 실선은 콘크리트 충전 강관의 하중-변위 관계로 내력 상승과 변형 능력의 증가가 눈에 띄게 나타나 있다.



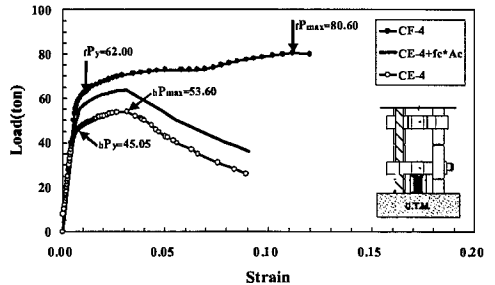
(a)



(b)



(c)

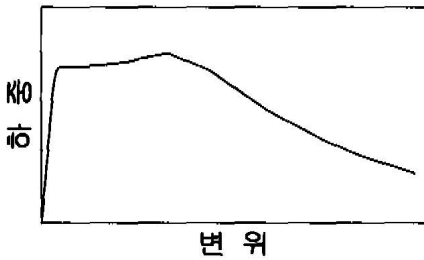


(d)

Fig. 2 하중-축변형도 관계

3. 실험 결과 비교 · 분석

실험 종료 후의 파괴 형태는 Fig. 2와 같이 콘크리트 충전 유·무에 따라 다르게 나타났다. 비충전 원형 강관 시험체인 CE-1, CE-2, CE-3 그리고 CE-4의 경우 최대 내력 이후 상부 또는 하부에 링모양의 좌굴이 발생하였고 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 항복 이후 최대 내력까지 완만한 상승곡선을 이루다가 최대 내력 이후 하중이 감소하는 파괴 모드1의 하중 변위 곡선을 이루고 있다.



(a) 모드 1



(b) 모드 2

Fig. 3 파괴 형태

충전 시험체인 CF-1, CF-2, CF-3 그리고 CF-4는 Fig. 3(b)와 같이 모두 최대 내력이후까지 어느 정도의 하중을 유지하면서 변위의 증가가 계속되는 파괴 모드2의 하중-변위 곡선을 나타냈다.

Table 4는 충전 시험체와 비충전 시험체의 항복 하중비, 최대 내력비, 초기 강성비를 나타낸 것이 이다. 비충전 시험체에 대한 충전 시험체의 내력 상승비는 1.49에서 2.07(평균 1.78), 최대 내력시 변위 증가비는 2.65에서 8.80(평균 5.83), 항복 하중 증가비

는 1.38에서 1.68(평균 1.47), 최대 내력 증가비는 1.49에서 2.07(평균 1.78) 그리고 초기 강성 증가비는 1.13에서 2.71(평균 1.79)로 나타났다. 또한 지름-두께비가 큰 시험체가 콘크리트 충전으로 인하여 최대 변형도 및 내력이 크게 증가하였다. 콘크리트 충전으로 내력상승뿐 아니라 비충전 시험체에서 나타나는 최대 내력 이후의 급격한 하중의 저하 현상이 없음을 보여주고 있다.

Table 4 충전 효과 비교

시험체	$\frac{f_{\delta_{max}}}{h \delta_{max}}$	$\frac{eP_y}{(ton)}$	$\frac{fP_y}{hP_y}$	$\frac{eP_{max}}{(ton)}$	$\frac{fP_{max}}{hP_{max}}$	K_i (t/mm)	$\frac{fK_i}{hK_i}$
CE-1	7.73	18.45	1.44	19.58	2.05	16.68	1.55
CF-1		26.55		40.20		25.78	
CE-2	8.80	20.30	1.68	21.90	2.07	15.50	1.13
CF-2		34.20		45.38		17.54	
CE-3	2.65	41.25	1.39	49.20	1.49	13.94	2.32
CF-3		57.50		73.20		37.83	
CE-4	3.61	45.05	1.38	53.60	1.50	19.93	1.75
CF-4		62.00		80.60		34.83	

$f_{\delta_{max}}/h \delta_{max}$: 비충전 시험체에 대한 충전 시험체의 최대 내력시 변형도비

fP_{max}/hP_{max} : 비충전 시험체에 대한 충전 시험체의 최대 내력비

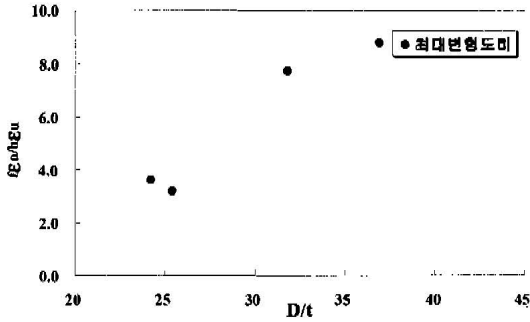
fP_y/hP_y : 비충전 시험체에 대한 충전 시험체의 항복 하중비

fK_i/hK_i : 비충전 시험체에 대한 충전 시험체의 초기 강성비

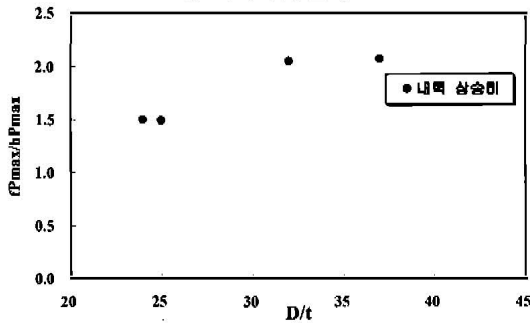
Fig. 4는 지름-두께비를 횡축으로 하고 종축은 충전 시험체와 비충전 시험체의 최대 내력시 변형도비, 내력 상승비 그리고 초기강성비를 보여주고 있으며 지름-두께비의 증가에 따라 초기 강성비는 감소하고 내력 및 최대 변형도는 증가하는 경향을 나타내고 있다.

4. 고 찰

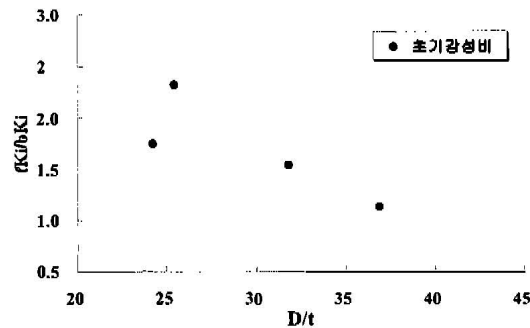
본 연구자의 실험과 다른 연구자들의 실험 데이터 (2), (3), (4), (5)를 이용하여 내력에 미치는 여러 요인들을 분석해 보고 구곡 콘크리트의 강도 예측식을 회귀분석을 통해 구하고자 한다. 이용한 자료의 콘크리트 압축강도는 $150kg/cm^2$ 에서 $1,384kg/cm^2$ 이고 강재의 항복 응력도는 $2.15t/cm^2$ 에서 $4.72kg/cm^2$ 범위에 있다.



(a) 최대 변형도비



(b) 내력 상승비



(c) 초기 강성비

Fig. 4 지름-두께비(D/t)와 총전 효과

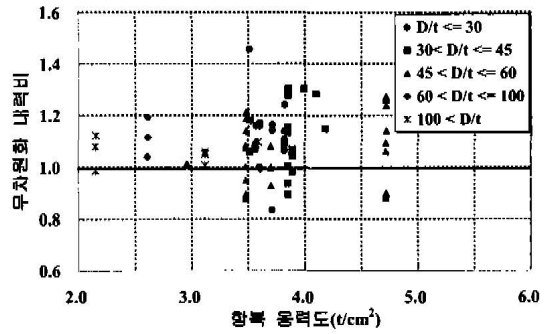
4.1 재료 강도가 내력에 미치는 영향

Table 5는 각국의 콘크리트와 강재의 범위를 나타낸 것이며, 영국과 중국의 콘크리트 강도는 육면체를 사용하고 그 외의 나라에서는 실린더형 공시체를 사용하고 있다. 표에서 알 수 있듯이 일본의 경우 콘크리트와 강재의 범위를 가장 넓게 규정하고 있음을 알 수 있다.

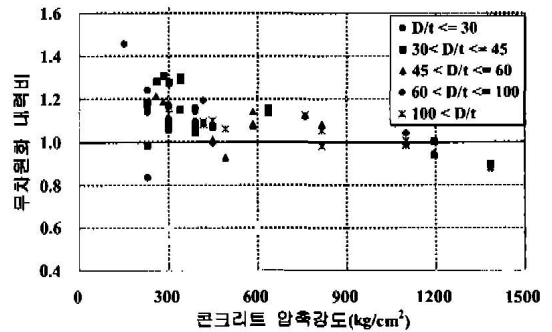
Table 5 각국 콘크리트와 강재의 강도 범위 비교

단위 : kg/cm^2

	일본 (AIJ)	중국 (CASCCS)	미국 (AISC)	미국 (ACI)	유럽 (EC4)	영국 (BS5400)
콘크리트	184~868	204 이상	214~570	-	210~510	163 이상
강재	2850~8500	2400~4000	없음	-	2400~3600	2800~3600



(a)



(b)

Fig. 5 콘크리트와 강재의 강도와 내력비 관계

Fig. 5에서 보는 바와 같이 강재의 항복 응력도 $3.5t/cm^2$ 에서 $4.0t/cm^2$ 사이의 지름-두께비 30에서 60사이의 일부 시험체와 콘크리트 강도가 $1000kg/cm^2$ 을 넘는 지름-두께비 30에서 45까지의 시험체가 단순 누가내력보다 작게 나타나 있다.

4.2 각국의 지름-두께비 제한

Table 6과 같이 각 국은 강관의 국부 좌굴을 방지하기 위하여 강종별로 지름-두께비의 한계치를 정하고 있다.

특히 일본에서는 비충전 강관의 지름-두께비 제한치 (100)의 1.5배인 150까지 충전 강관에 대한 제한을 완화하고 있으며, SPS490(73)의 경우 100까지 확대 적용하고 있다. 그 다음으로 유럽(90), 중국(85), 미국(83), 영국(83)순으로 작게 정하고 있다.

국내 규준의 제정시 지름-두께비의 한계를 완화해야 할지는 더 많은 실험 자료를 분석해 보고 적용 가능한 재료강도의 범위를 두는 것이 바람직하리라 사료된다.

Table 6 각국 지름-두께비 제한 비교

	식6	SPS 400	SPS 490	단위 (F.F.v)
일본(AIJ)	1.5×240/F	150	100	tf/cm ²
중국(CASCCS)	85√(235/F _v)	85	69	N/mm ²
미국(AISC)	√(8E _s /F _v)	83	67	ksi
미국(ACI)	√(8E _s /F _v)	83	67	ksi
유럽(EC4)	90√(235/F _v)	90	70	N/mm ²
영국(BS5400)	√(8E _s /F _v)	83	67	ksi

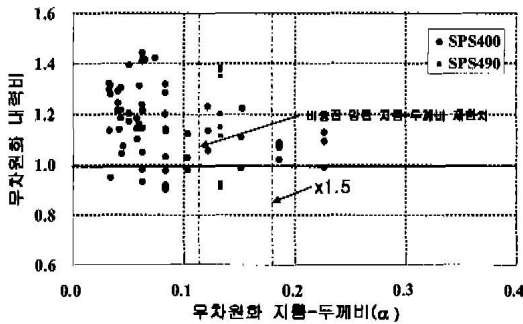


Fig. 6 무차원화 내력비와 지름-두께비 관계

Fig. 6의 종축은 실험치 최대 내력을 단순누가강도 ($P_o = f_c A_c + \sigma_y A_s$)로 무차원화한 것이며 횡축은 강관의 항복 응력도를 고려하기 위해 무차원화한 지름-두께비 ($\alpha = \frac{D}{t} \frac{\sigma_y}{E_s}$)이며 이때 강관의 영계수 (E_s)는 $2100t/cm^2$ 을 사용하였다. 일부 시험체의 경우 내력비가 1이하로 떨어지는 것이 보이는데 이는 보통 강도강관 (SPS400)과 초고강도콘크리트 ($1,100 \text{ kg/cm}^2 \leq f_c \leq 1,384 \text{ kg/cm}^2$)를 사용한 것이며 그 원인 중 하나는 콘크리트의 강도가 높아짐에 따라 구속된 콘크리트의 부피 팽창이 감소하고 취성적으로 파괴하였기 때문으로 사료된다.

4.3 축강성과 지름-두께비 관계

기둥의 축방향 강성이 문제가 되는 탄성 범위에 있어서는 콘크리트와 강관이 일축 응력상태로 보아도 좋으며 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$(EA)_{CFT} = E_s A_s + E_c A_c \quad (1)$$

보통콘크리트의 탄성계수는 허용 응력도 규준에 따라 아래와 같이 구한다.⁽⁴⁾

$$E_c = 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{\gamma}{2.3} \right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{f_c}{200}} \quad (2)$$

고강도 콘크리트의 탄성계수는 아래식을 적용하였다.

$$E_c = 4(f_c/1000)^{1/3} \times 10^5 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 γ : 단위체적 중량 (t/m^3)

Fig. 7은 종축에 콘크리트 충전에 따른 축강성의 증가비 ($(EA)_{CFT}/E_s A_s$)를 횡축에는 지름-두께비를 표시하고 있다. 그림으로부터 지름-두께비가 60정도인 초고강도 콘크리트의 경우 ($f_c = 1100 \text{ kg/cm}^2$)는 비충전 강관의 축강성 보다 4배 정도 증가하고 보통강도 콘크리트 ($f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$)의 경우는 2.5배정도 증가한다.

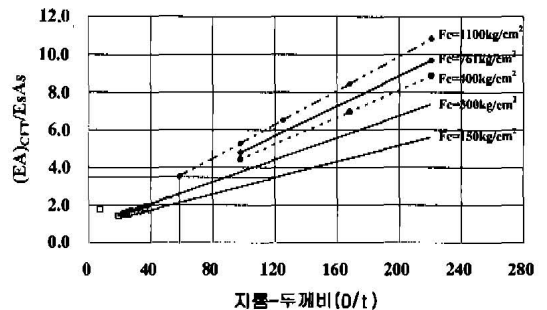


Fig. 7 무차원화 내력비와 지름-두께비 관계

4.4 콘크리트 강도 저감계수

일본 규준식에서 제시하고 있는 콘크리트 강도 저감 계수($\gamma_c = \frac{eP_{max} - A_s\sigma_y}{A_c f_c}$)에 대해서 알아 보고자 66개의 실험데이터를 이용하여 아래 Fig. 8과 같이 나타낸 결과 평균 1.3정도로 크게 나타났다.

그 원인은 강관의 구속효과에 의한 것으로 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 강관의 국부좌굴, 강관의 변형도 경화 그리고 콘크리트의 변형능력의 한계라 사료 된다.

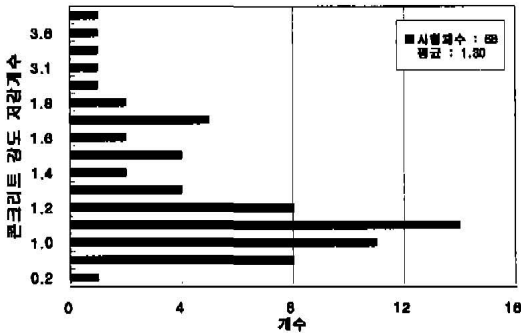


Fig. 8 콘크리트의 강도저감계수

4.5 구속 콘크리트 압축 강도의 예측

구속 콘크리트의 압축 강도는 CFCT단주가 최대 내력에 달할 때의 콘크리트의 응력도로서 그 값은 아래 식으로 정의될 수 있다. (5)

$$f_{ce} = \frac{[eP_{max} - (\sigma_u/\sqrt{3})A_s]}{A_c} \quad (4)$$

Fig. 9는 실험 데이터를 이용하여 횡축은 충전 콘크리트와 강관의 강도비($\rho = f_c A_c / \sigma_u A_s$)이며 종축은 구속 콘크리트 강도(f_{ce})와 재료 시험으로 구한 콘크리트의 압축 강도비를 나타낸 것이다. 회귀 결과로부터 구속 콘크리트의 압축강도를 아래식으로 표시된다.

$$f_{ce} = (1.576\rho^{-0.441}) \times f_c \quad (R^2 = 0.9675) \quad (5)$$

구속 효과에 따른 콘크리트의 강도 상승은 구속계수와 콘크리트 표면에 작용하는 응력도로 표시되는 경우가 많은데 이것은 최대 내력이 단순누가내력을 상회하는 경우에만 적용할 수 있지만 (5)식은 누가내력 이하의 경우도 적용 가능하다.

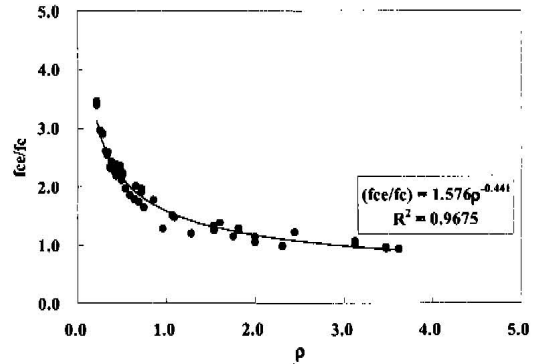


Fig. 9 무차원화 구속콘크리트 압축강도와 재료강도비

감사의 글

본 논문은 진주산업대학교 기성희 연구비 지원에 의한 결과의 일부이며 자료 수집에 도움을 준 이명호, 권동락, 정동준군에게 감사의 마음을 표합니다.

5. 결 론

이상과 같은 충전콘크리트 원형강관 단주의 축압축 실험 및 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비충전 시험체와 충전 시험체 모두 국부좌굴에 의해 최대 내력이 결정되었으며 충전 강관의 경우 최대 내력시까지 완전한 상승곡선을 나타내고 그 이후도 급격한 하중저하현상은 나타나지 않았다.
- 2) 지름 두께비의 증가에 따라 초기 강성비는 감소하고 내력 및 최대 변형도는 증가하는 경향을 나타냈다.
- 3) 비충전 시험체에 대한 충전 시험체의 내력상승비는 1.49에서 2.07, 최대 내력시 변형도 증가비는 2.65에서 8.80, 초기강성 증가비는 1.13에서 2.71로 나타났다.

- 4) 지름-두께비가 60정도인 초고강도 콘크리트의 경우($f_c = 1100 \text{ kg/cm}^2$)는 비충전 강관의 축강 성보다 4배 정도 증가하고 그 보다 낮은 강도 콘크리트($f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$)는 2.5배정도 증가 한다.
- 5) 충전 콘크리트와 강관의 강도비($\rho = f_c A_c / \sigma_y A_s$)와 구속 콘크리트 강도(f_{ce})로 회귀 분석결과 구속 콘크리트의 압축강도는 아래식으로 표시될 수 있다.

$$f_{ce} = (1.576\rho^{-0.441}) \times f_c \quad (R^2 = 0.9675)$$

참 고 문 헌

1. 韓國鋼構造學會 : 2000. 5. 콘크리트 충전鋼管 構造技術講演, pp. 3~30.
2. 김진호외 1인 : 1999. 10., "콘크리트 충전 鋼管 短柱의 終局耐力評價에 關한 實驗的 研究", 韓國鋼構造學會 論文集, pp. 495~506.
3. 朴正旻 : 1995. 12., "콘크리트 充填鋼管 部材 를 利用한 複合構造 開發에 關한 研究", 慶北大 學校大學院 博士學位論文.
4. Russell Bridge & Martin O'shea : 1997, "Australian Composite Code Concrete Filled Steel Tubes", ASCCS Seminar 18th, pp. 59~72.
5. 最相元雄外 2人 : 1999. 9. 超高强度 콘크리트 充填鋼管柱의 終局曲げ耐力에 關する 研究, 日本 建築學會 構造系論文集, 제523호, pp. 133~140.
6. 松井千秋外 4人 : 1998. 8. 콘크리트 充填鋼管柱의 構造性能과 軸力制限値, 日本建築學會 構造系論文集, 제512호, pp. 181~188.
7. 日本建築學會 : 1997, Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structure.
8. Eurocode 4 Editorial Group : 1992, Eurocode No.4 for Design of Composite Steel and Concrete Structures, 4-21~4-37.
9. Goode, C. D. : June 1994, Composite Columns State of the Art, ASCCS, pp. 63~69.
10. American Institute of Steel Construction : 1994, Chapter I of the Load and Resistance Factor Design.
11. L. K. Luksha and S. V. Shevchenko : June 1997, Projected Belarus Code for Concrete Filled Steel Tube Columns, ASCCS, pp. 83~92.

(접수일자 : 2000년 10월 13일)