

CFT 기둥의 부착응력에 관한 연구

권승희¹⁾ · 김진근^{1)*}

¹⁾한국과학기술원 토목공학과

(2000년 10월 10일 원고접수, 2001년 1월 30일 심사완료)

Bond Stress in Concrete Filled Steel Tubular Column

Seung-Hee Kwon¹⁾, and Jin-Keun Kim^{1)*}

¹⁾Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

(Received on October 10, 2000, Revised on January 30, 2001)

ABSTRACT

CFT column has excellent structural properties due to the composite action between concrete and steel tube. The bond behavior between the constituent elements has to be found for analyzing the behavior of CFT column. A new model is necessary because most of existing models for bond stress-slip relationship of the deformed bar cannot be applied to the CFT column. Therefore, the objective of this research is to develop a new model related to the bond behavior of CFT column considering the relation between bond stress and vertical stress, and the distribution of lateral stress under the confinement created by steel casing.

From equilibrium condition, the formula for relationship between bond stress and vertical stress is derived, and the relationship for the lateral stresses of the CFT column section is obtained by an Airy stress function. The experiments are performed for five CFT column specimens axially loading on concrete alone. The relation between bond strength and lateral stress is investigated from the regression analysis using the measured strains.

Finally a new bond strength model is proposed, which is able to predict the relationship for the stress of each direction of CFT column loading on concrete.

Keywords : bond stress, triaxial compression, slip, CFT column, bond strength model

1. 서 론

CFT 기둥은 원형 또는 각형의 강관에 콘크리트를 채운 부재로 탁월한 구조적 성능을 발휘하는데, 이는 강관과 콘크리트의 복합거동에 기인하는 것이다. 실제 CFT 기둥에 상부층의 기둥과 보를 통하여 힘이 전달되는데, 이 때 전달되는 힘이 강관, 충전 콘크리트, 또는 두 재료에 동시에 가해진다. 이러한 경우 각 단면에서의 내력을 예측하기 위해서는 두 재료면 사이의 부착거동을 먼저 파악하여야 할 필요가 있다. 이 부착거동은 이형철근에 적용되는 CEB-FIP Model Code 1990¹⁾의 부착응력과 미끄럼(slip)에 관한 모델식으로 나타낼 수 없으며, 새로운 모델식의 개발이 요구된다. 그러나 CFT 기둥에 관한 대부분의 연구에서 부착응력을 정량적으로 고려하지 않고, 실험적으로 강도에 미치는 효과를 파악하거나 강관에 의한 구속효과만을 고려하고 있다^{2~5)}. 따라서 CFT 기둥에서 부착응력이 발생하는 메커니즘을 고려하여, 응력 및 변형률의 크기를 예측할 수 모델

식을 개발하는 것은 CFT 기둥의 거동을 정확히 해석하는데 있어 필수적이라 하겠다.

본 논문이 목적하는 바는 구속압이 발현된 상태의 CFT 기둥에서 콘크리트와 강관의 부착응력과 수직응력의 관계, 기둥단면에서의 응력 분포도를 고려한 부착거동에 관한 모델식의 개발이다. 이를 위해 축소된 원형 CFT 기둥에 대해 실험을 실시하였으며, 측정된 변형률로부터 회귀분석의 방법을 통해 새로운 부착강도 모델식을 개발하였다. 개발된 모델식은 강재와 콘크리트 사이의 점착력과 마찰계수를 실험적으로 구한 것으로, CFT 기둥 외에도 이와 같은 부착거동을 보이는 경우에 대해 적용이 가능하다.

2. 콘크리트와 강관의 부착응력과 수직응력의 관계

Fig. 1은 CFT 기둥에서 콘크리트만 가압한 경우의 형상이다. 강관에 의해 콘크리트가 구속되는 경우의 하중상태로 이와 같은 경우를 가정하였다. Fig. 2는 강관의 길이 방향으로 임의의 Δz 구간에서 수직방향의 콘크리트 응력 ($\sigma_{zz,c}$)과 강관 응력 ($\sigma_{zz,s}$)의 변화와 부착응력 (τ_b)의 평

* Corresponding author

Tel : 042-869-3614 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

형상태를 나타내고 있다. 식의 유도에 있어 길이와 응력 및 하중에 대해 고려한 단위는 각각 cm, kgf/cm², kgf이다.

Fig. 2에서 콘크리트와 강관의 단면적(A_c , A_s)은 다음과 같다. r_1 과 r_2 는 각각 콘크리트와 강관의 반지름이다.

$$A_c = \pi r_1^2 \quad A_s = \pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (1)$$

중심축에 하중 P 가 가해진다면 길이 방향의 임의의 구간 Δz 에서 다음과 같은 평형 방정식이 성립한다. $\Delta\sigma_{zz,c}$ 와 $\Delta\sigma_{zz,s}$ 는 각각 콘크리트와 강관의 구간내 응력 변화량이다.

$$\begin{aligned} P &= A_c \sigma_{zz,c} + A_s \sigma_{zz,s} \\ &= A_c(\sigma_{zz,c} + \Delta\sigma_{zz,c}) + A_s(\sigma_{zz,s} + \Delta\sigma_{zz,s}) \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식과 강관과 콘크리트 각각에 대한 응력 관계를 고려하면 다음과 같이 수직응력의 변화가 부착응력으로 표현될 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$\Delta\sigma_{zz,c} A_c = -\Delta\sigma_{zz,s} A_s = 2\pi r_1 \tau_b \Delta z \quad (3)$$

식(1), (2)와 (3)에서 부착응력 τ_b 에 관한 관계식을 얻을 수 있고, $\Delta z \rightarrow 0$ 으로 함으로써 한 점에서의 부착응력을

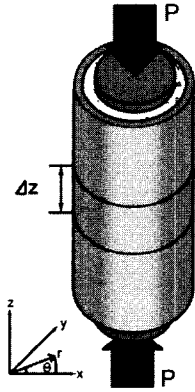
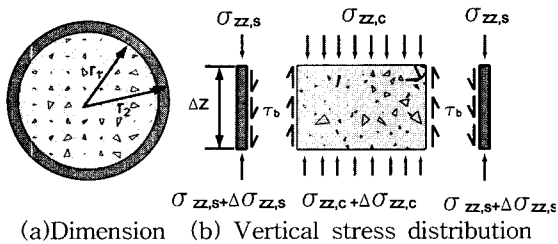


Fig. 1 Loading on concrete of CFT column



(a) Dimension (b) Vertical stress distribution

Fig. 2 Dimension and vertical stress distribution in Δz

얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_b(z) &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \tau_b = \frac{r_1}{2} \frac{d\sigma_{zz,c}}{dz} \\ &= -\frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_1} \frac{d\sigma_{zz,s}}{dz} \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 보면, 임의의 길이방향 위치에서의 부착응력은 강관이나 콘크리트의 수직응력에 대한 그 위치에서의 미분값에 단면의 크기에 관한 상수를 곱하여 구할 수 있다. 고려되는 좌표축의 원점을 CFT 기둥의 한 쪽 끝 단면으로 잡았을 때 강관에 가해지는 외부의 응력이 없으므로 길이 방향으로 강관의 수직응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{zz,s}(z) = -\frac{2r_1}{r_2^2 - r_1^2} \int_0^z \tau_b(t) dt \quad (5)$$

식(2)의 평형조건과 식(5)로부터 콘크리트의 수직응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{zz,c}(z) &= \frac{P}{A_c} - \frac{A_s}{A_c} \sigma_{zz,s}(z) \\ &= \sigma_{zz,c}(0) + \rho \frac{2r_1}{r_2^2 - r_1^2} \int_0^z \tau_b(t) dt \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\rho = A_s/A_c$ 이다. 따라서 강관과 콘크리트에 대한 길이방향으로의 응력분포는 부착응력의 적분함수로 나타난다는 것을 알 수 있다.

3. CFT 기둥 단면에서의 응력

Fig. 3은 강관에 의해 콘크리트가 구속된 CFT 기둥 단면에서의 응력 분포를 나타내고 있다. 이 해석은 이차원 문제로 고려할 수 있으며, 축대칭 문제에 대해 유도되는 응력 함수(stress function, Φ)와 각 방향의 응력은 다음과 같다^{6,7)}. 여기서 A , B , C , D 는 상수이고, r 은 원통 좌표계(cylindrical coordinate)에서 반지름 방향의 좌표를 의미한다.

$$\Phi = A \log r + Br^2 \log r + Cr^2 + D \quad (7)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{A}{r^2} + B(1 + 2 \log r) + 2C \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} = \frac{-A}{r^2} + B(3 + 2 \log r) + 2C \quad (9)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (10)$$

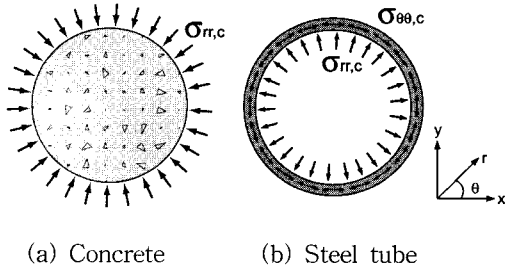


Fig. 3 Relations of stresses in CFT column section

위의 식에서 중심부가 채워진 상태, 즉 콘크리트 부분의 응력을 고려할 때, $r \rightarrow 0$ 이면 응력 성분은 무한대가 된다. 따라서 식(8)과 식(9)에서 상수 A 와 B 는 없어지게 된다. 따라서 내부에 구멍이 없고, 체적력(body force)이 없다면 응력은 다음과 같다. $\sigma_{rr,c}$ 와 $\sigma_{\theta\theta,c}$ 는 콘크리트 단면의 횡방향 응력 성분들이다.

$$\sigma_{rr,c} = \sigma_{\theta\theta,c} \quad (11)$$

그러므로 내부의 콘크리트가 3축압 상태에 놓일 경우 횡방향 응력성분들이 항상 같다는 것을 알 수 있다. 강관만을 고려해 보면, 내부에 구멍이 있는 상태에서 응력 상태는 식(8)과 식(9)로부터 다음과 같이 유도할 수 있다. $\sigma_{rr,s}$ 와 $\sigma_{\theta\theta,s}$ 는 강관 단면의 횡방향 응력성분들이다.

$$\sigma_{rr,s} = \frac{r_1^2 \sigma_{rr,c}}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad r_1 \leq r \leq r_2 \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta\theta,s} = \frac{r_1^2 \sigma_{rr,c}}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) \quad r_1 \leq r \leq r_2 \quad (13)$$

일반적으로 CFT 기둥의 경우 r_1 과 r_2 의 차이, 즉 전체 단면적에 비해 강관의 단면적이 매우 작다. 따라서 식(12)의 값은 식(13)에 비해 무시할 정도로 작아지게 된다. 따라서 해석시에는 식(12)에 의해 계산되는 응력은 고려하지 않는 것이 일반적이다. 또한 식(13)에서 계산되는 값도 강관의 단면내에서 변하지만, 두께가 단면의 크기에 비해 매우 작아($r_1 \approx r_2$) 응력이 변화하는 크기는 무시하고, Fig. 4에 나타난 것과 같이 계산되는 응력이 강관의 단면내에 균일하게 작용한다고 가정하여도 무방하므로 식(14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{\theta\theta,s} = \frac{r_1}{(r_2 - r_1)} \sigma_{rr,c} \quad (14)$$

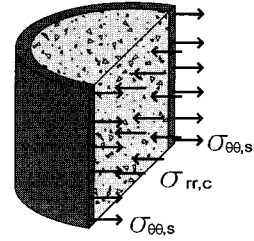


Fig. 4 Stress distribution of CFT column section

4. 부착강도 모델식 개발

4.1 개요

CFT 기둥에서 콘크리트가 강관에 의해 구속압을 받는 경우 강관과 콘크리트 사이의 응력관계와 미끄럼을 해석하기 위해선 부착응력에 관한 모델식이 기본적으로 필요하다. 콘크리트와 이형철근의 부착응력-미끄럼에 대한 식은 CEB-FIP Model Code 1990¹⁾에 제시되어 있는데, 이는 이형철근의 마다에 의한 콘크리트의 미세 균열(micro cracking), 미세 파쇄(micro crushing), 미세 쪼개짐(micro splitting)등에 의해 나타나는 관계를 표현한 모델식이다. 그러나 이 모델식이 고려하고 있는 파괴 메카니즘(mechanism)은 CFT 기둥에서 부착응력 발생에 대한 메카니즘과는 판이하게 다르다. CFT 기둥의 경우 부착응력은 포아송 비에 의한 콘크리트의 횡방향 변형이 강관에 의해 구속되고, 이로 인해 발생한 구속압이 작용하는 상태에서 콘크리트의 수직 변위가 발생할 때 일어나는 것이다.

Fig. 5는 이형철근과 원형철근에 대한 부착응력과 미끄럼을 개략적으로 나타낸 것이다. 이형철근의 경우가 위에서 언급한 CEB-FIP Model Code 1990¹⁾에서 제시하는 모델식에 해당되는 경우이고, 원형철근의 경우가 CFT 기둥과 비슷한 관계를 나타내는 것이다. Fig. 5에서는 구속압이 없을 때 원형철근의 부착강도는 콘크리트와 철근의 점착력에 의해서만 발생하는 것으로 나타나 있으며⁸⁻¹⁰⁾, 부착응력이 부착강도에 도달할 때까지 미끄럼은 거의 없다. 구속압이 존재하는 경우에 부착강도는 구속압의 크기가 증가함에 따라

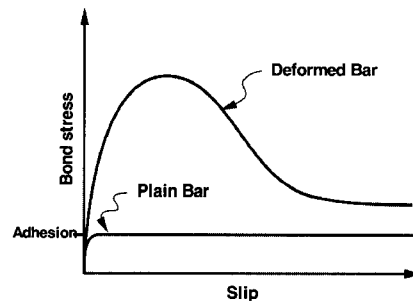


Fig. 5 Relationship of the bond stress and slip

증가하게 될 것이다. CFT 기둥의 경우가 이에 해당되며, 부착강도와 구속압과의 관계로 표현되는 모델식의 개발은 CFT 기둥의 응력 및 변형률 해석을 위해서 필수적으로 요구되는 것이다.

4.2 부착강도 모델식 개발을 위한 실험

개발하고자 하는 부착강도 모델식은 강관에 의해 콘크리트가 구속될 때 콘크리트에 발생하는 구속압($\sigma_{m,c}$)과 콘크리트와 강관의 접촉면에서의 부착강도(τ_b) 관계를 나타내는 것이다. 이는 서로 다른 재료의 접촉면 특성으로 재료 역학적인 관점에서 파악하기에는 어려움이 있어 실험적인 방법으로 그 관계를 얻고자 하였다. Fig. 6은 실제 실험체의 실험모습이다.

실험방법은 콘크리트와 강관을 사용하여 만든 5개의 CFT 기둥에 콘크리트에만 하중을 가하여 콘크리트가 강관에 의해 구속되도록 하고, 하중 단계별로 강관의 각 위치에서 횡방향 변형률과 길이방향 변형률을 강제용 변형률 게이지를 통해 측정하는 것이다. 하중 재하는 만능시험기(U.T.M)를 사용하였고 재하 속도는 최대 하중까지 20분 이내에 도달하도록 하였다. 변형률 게이지는 Fig. 7(a), (b)와 같이 수직 방향으로 5개의 게이지를 서로 120°를 이루는 강관의 3면에 부착하였으며, 수평방향으로도 같은 위치에 게이지를 서로 180°를 이루는 2면에 부착하였다.

실험에 사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다. 배합강도는 실제 CFT 기둥의 경우에 고강도 콘크리트를 사용하는 것을 고려하여 목표 압축강도를 600 kgf/cm²로 하였다. 콘크리트의 경우 재령 28일의 탄성계수는 385,000 kgf/cm²이고 압축강도는 583 kgf/cm²이었다. $\phi 140 \times 560$ mm 이고 두께가 2.9 mm인 강관에 콘크리트를 타설하였다. 강관의 경우 탄성계수와 항복강도는 각각 2,170,000 kgf/cm²과 2,700 kgf/cm²이다. 강관에 대한 실험에서 포아송비 또한 측정했는데 0.29로 나타났다.

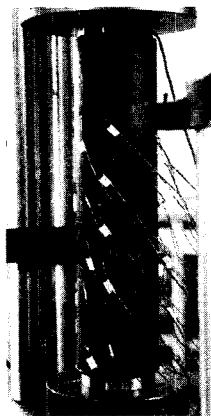


Fig. 6 CFT column specimen

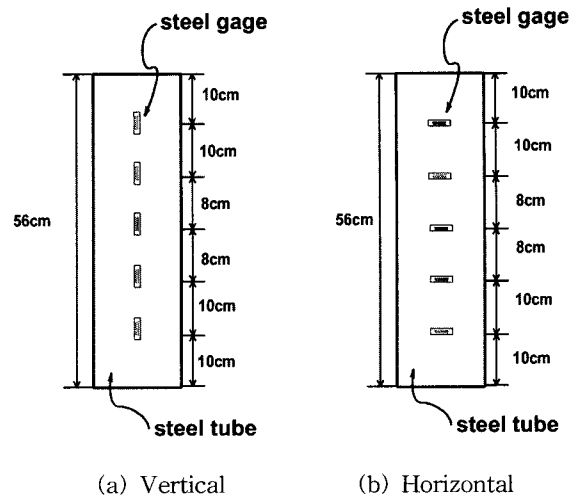


Fig. 7 Gages on steel tube

Table 1 Mix proportion of concrete

Water-cement ratio(%)	Fine aggregate ratio(%)	Unit weight(kgf/m ³)				
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super plasticizer
30	42	160	533	726	1003	5.33

각 하중단계에서 측정된 수직방향과 수평방향의 변형률을 식(15)에 대입하여 각 방향의 응력을 얻을 수 있다. 여기서 ϵ , E , ν , σ 는 각각 변형률, 탄성계수, 포아송 비, 응력을 의미한다. i, j 는 방향을 나타내는 첨자이다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu \sigma_{mm}] \quad (15)$$

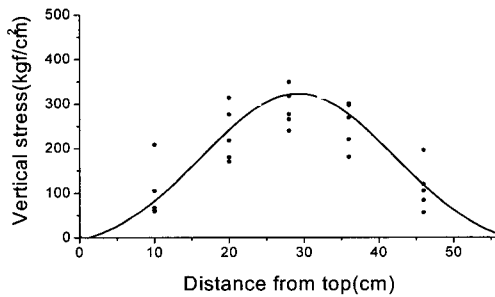
이 응력들을 회귀분석하여 수직응력의 분포와 수평응력의 분포를 구하였는데, Fig. 8(a)는 30 tonf 재하시 강관의 수직 응력에 대한 실험값과 회귀분석 결과이다. 같은 위치에서의 측정값들이 실험체 마다 차이를 보이는데, 이는 내부 콘크리트의 다짐 정도 차이와, 실험상에서 편심의 영향에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 응력의 분포 경향이 뚜렷하여, 회귀분석의 방법을 적용하는데 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

이 회귀분석한 수직응력 분포로부터 식(4)를 이용하여 부착응력의 분포를 구할 수 있다. Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 회귀분석 결과로부터 얻은 부착응력의 분포를 나타내고 있다. 실험시 가압판과 콘크리트의 마찰력으로 인해 단부에서 콘크리트의 횡방향 변형이 구속되어 부착응력의 최대점이 양 끝단에서 중심쪽으로 이동한 것으로 보인다. 이 부착응력의 분포를 길이방향으로 정적분하여 평균 부착응력을 구할 수가 있다. 다음으로 30 tonf 재하시 강관의 수평방향 응력의 측정값과 회귀분석한 곡선은 Fig. 8(c)에 나타나 있다.

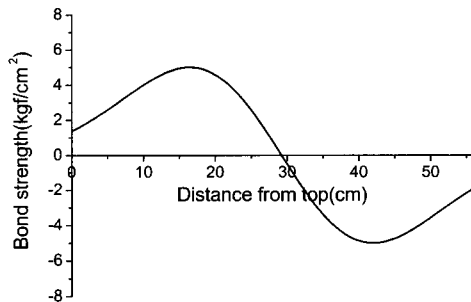
이 수평방향 응력분포로부터 식(11)과 (14)를 이용하여 콘크리트의 횡방향 구속압을 구할 수 있으며, 이 콘크리트의 구속압 분포를 길이방향으로 정적분하여 평균 구속압을 구할 수 있다. 이와 같은 과정을 0에서 50 tonf까지 5 tonf 씩 증가시키며 반복 수행하여 각 하중 단계별로 평균 부착응력과 평균 구속압을 구하였으며, 이것으로부터 부착강도와 구속압과의 관계를 얻을 수 있다. 강관의 변형률이 탄성범위를 초과하지 않는 하중 범위로, 최고하중의 40 퍼센트 정도인 50 tonf까지의 하중 단계를 고려하였다.

4.3 부착강도 모델식

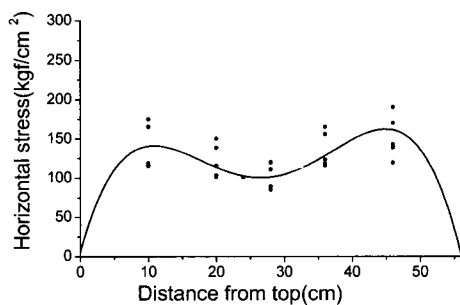
Table 2는 4.2절의 실험으로부터 얻은 부착강도(τ_b)와 구속압($\sigma_{rr,c}$)에 관한 관계표이다. Fig. 9에서 점들은 Table 2의 실험값들이고 직선은 실험값들을 회귀분석하여



(a) Axial stress of steel tube



(b) Bond strength distribution



(c) Lateral stresses of steel tube

Fig. 8 Stress distribution(30tonf)

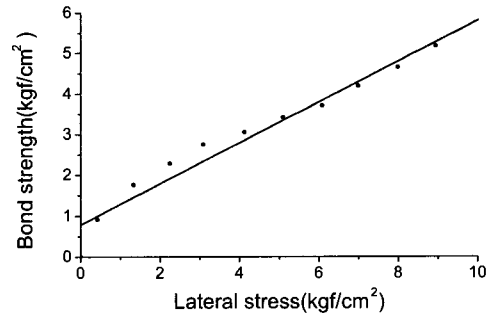


Fig. 9 Relationship of bond strength and lateral stress

Table 2 Bond strength and lateral stress

Load(tonf)	Bond strength (τ_b , kgf/cm ²)	Lateral stress ($\sigma_{rr,c}$, kgf/cm ²)
5	0.91	0.42
10	1.76	1.33
15	2.28	2.24
20	2.75	2.08
25	2.05	4.12
30	2.41	5.09
35	2.71	6.07
40	4.18	6.97
45	4.46	7.97
50	5.17	8.93

얻은 관계식을 나타내고 있다. 이 관계식에서 수직축과 만나는 점은 점착력에 의한 부착강도를 나타내고 구속압이 증가함에 따라 부착 강도가 선형으로 증가하는 것을 알 수 있다. 회귀분석하여 얻은 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_b = 0.78 + 0.50\sigma_{rr,c} \quad (16)$$

여기서, τ_b 와 $\sigma_{rr,c}$ 의 단위는 kgf/cm²이다.

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1) CFT 기둥의 길이방향 응력분포와 단면내 응력 분포를 고려하여, CFT 기둥에서 콘크리트에만 하중을 가하는 실험을 통해 새로운 부착강도 모델식을 제안하였다.

2) CFT 기둥에서 강관에 의해 콘크리트가 구속되는 경우 임의의 위치에서의 부착응력은 강관이나 콘크리트 수직 응력의 미분값으로 표현되며, 길이방향의 응력 분포는 부착 응력의 적분함수로 나타난다.

3) CFT 기둥 단면의 응력 분포는 콘크리트의 경우 단면 내의 모든 부분에서 동일하며, 직경에 비해 두께가 매우 작은 강관의 횡방향 응력은 종 단면의 응력 평형 관계로부터 일정한 값으로 가정하여도 무방하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한양대 STRESS의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Comite Euro-International Du Beton, "CEB-FIP Model Code 1990," 1990, pp.82~87.
2. Gardner, N. J., and Jacobson, E. R., "Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tubes," *ACI Structural Journal*, Vol.64, No.38, 1967, pp.404~412.
3. Furlong, R. W., "Design of Steel-Encased Concrete Beam-Columns," ASCE, *Journal of Structural Division*, Vol.95, No.ST1, 1968, pp. 267~281.
4. 박정민, 김화중, "원형강관으로 구축된 콘크리트의 역학적 거동 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 3호, 1995, pp.199~210.
5. Kilpatrick, E., and Rangan, B. V., "Influence of Interfacial Shear Transfer on Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Columns," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.4, 1999, pp.642~648.
6. Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., "Two Dimensional Problem in Polar Coordinate," *Theory of Elasticity: Engineering Mechanics Series*, McGraw-Hill, 1970, pp.65~149.
7. Saada, A. S., "Thick Cylinders, Disks, and Spheres," *Elasticity Theory and Applications*, Pergamon, 1974, pp.323~351.
8. Reinhardt, H. W., and Balazs, G. L., "Steel-Concrete Interface: Experimental Aspects," *Mechanics of Geomaterial Interfaces*, Elsevier Series Studies in Applied Mechanics, 1995, pp.225~279.
9. Comite Euro-International Du Beton, "Serviceability Models," Bulletin 235, 1997, pp.86~95.
10. Vos, E., and Reinhardt, H. W., "Bond Stress-Slip Behaviour of Deformed Bars, Plain Bars and Strands under Impact Loading," *Bond in Concrete* (ED. P. Bartos), Proceedings, Applied Science Publishers London, 1982, p.173.

요 약

CFT 기둥은 탁월한 구조적 성능을 발휘하는데, 이는 강관과 콘크리트의 복합거동에 기인하는 것이다. 이러한 CFT 기둥의 거동을 예측하기 위해서는 강관과 콘크리트 사이의 부착거동을 파악해야 한다. 그러나 이형철근을 대상으로 한 대부분의 기존 모델식은 CFT 기둥에 적용할 수 없으므로, 새로운 모델식의 개발이 필요하다. 본 논문의 목적은 구속압이 발현된 상태의 CFT 기둥에서 콘크리트와 강관의 부착응력과 수직응력의 관계, 기둥단면에서의 응력 분포도를 고려한 부착거동에 관한 모델식의 개발이다.

평형조건으로부터 콘크리트와 강관의 부착응력과 수직응력의 관계를 유도하였으며, 이차원 문제의 Airy 응력함수(stress function)로부터 CFT 기둥 단면에서의 횡방향 응력 관계를 파악하였다. 그리고 5개의 CFT 기둥 실험체에 대해 콘크리트에만 하중을 가하는 실험을 실시하였고, 측정된 변형률로부터 회귀분석의 방법을 통해 부착강도와 횡방향 구속압의 관계를 파악하였다. 이로부터 새로운 부착강도 모델식을 제안하였으며, CFT 기둥에서 콘크리트만 가압한 경우의 각 방향 응력관계를 파악하였다.

핵심용어 : 부착응력, 삼축 압축, 미끄럼, CFT 기둥, 부착강도 모델식
