

철근 콘크리트 기둥의 휨-전단 파괴거동에 관한 연구

Flexural-Shear Behavior for RC Columns

이 수 곤*
Lee, Soo Gon

홍 성 길**
Hong, Sung Gul

ABSTRACT

This paper presents a truss model for RC columns subjected to axial load and lateral load. The presented model is based on a stress field for the flexural-shear failure of short columns, which represent shear failure and bond splitting failure. Using this model, failure strength and related deformation of RC columns are investigated. Particular emphasis is placed on models capable of representing the interaction between deformation and shear strength.

1. 서론

현재 설계기준에서는 기둥의 전단강도에 대해 경험식으로 전단파괴가 발생하지 않게 하고 있다. 그러나, 내진설계에 있어서 연성도도 중요한 의미를 지니며 파괴시의 변형능력에 대한 고려가 필요하다.

기둥의 전단강도와 변형의 관계에 대해서는 Priestley^{1),2),3)} 등의 실험에 의해 많이 이루어져 왔다. 그러나, 이러한 연구 또한 경험식에 의존하여 가정된 변형도에 따른 전단강도만을 제시함으로써 실제 파괴시 강도와 변형을 제시하지 못하고 있다.

본 논문에서는 전단에 의한 취성파괴가 발생하기 쉬운 단주에 초점을 두어 발생 가능한 파괴양상을 설명할 수 있는 트러스 모델을 제시한다. 그리고, 이를 이용하여 각 파괴양상에서의 파괴강도를 산정하고 파괴가 발생할 때의 기둥의 휨변형을 산정함으로써 기둥의 변형능력과 전단강도와의 관계를 제안한다. 이로써 기둥의 최대강도를 예측하고, 또한 최대강도시 변형량을 산정함으로써 기둥의 효율적인 거동을 유도하는데 연구의 목적이 있다.

2. 파괴 양상 및 모델링

휨력이 작용하는 기둥에 대해 파괴시의 균열형상을 바탕으로 파괴양상에 대한 소성학적 접근을 할 수 있다. 일반적으로 기둥의 파괴는 그림 2에서처럼 세 가지 형태의 파괴가 나타난다. 전단력에 비해 휨모멘트가 크게 작용하는 장주의 경우 그림 2(a)처럼 휨파괴가 발생한다. 그리고, 단주에서 휨모멘트에 비해 전단력의 영향이 큰 경우, 특히 주기하중이 작용했을 때는 그림 2(b) 또는 (c) 처럼 대각선

* 정회원, 서울대학교 건축학과 대학원

** 정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

균열이 생기는 전단파괴가 발생한다. 그림 2(c)는 전단에 의해 대각선 균열이 발생한 이후 충분한 후프철근의 전단보강 효과에 의해 파괴 균열면에서 파괴가 발생하기 전 주근을 따라 부착파괴가 발생하는 경우이다. 이러한 균열 형상을 근거로 기둥에 작용하는 응력상태를 응력장으로 나타내면 그림 3과 같이 모델링될 수 있다.

그림 3의 응력장 모델은 주근 항복이후의 파괴양상을 설명하는데, 휨파괴는 (A)영역, 전단파괴는 (B)영역, 그리고 부착파괴는 (C)영역에서 발생한다. 본 논문에서는 취성파괴 양상을 나타내는 (B)영역과 (C)영역에서의 파괴만을 고려하기로 한다.

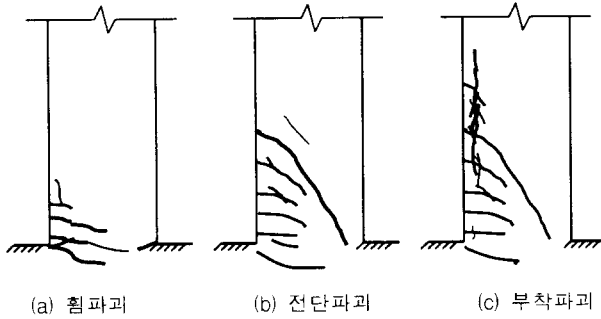


그림 2 기둥의 파괴양상

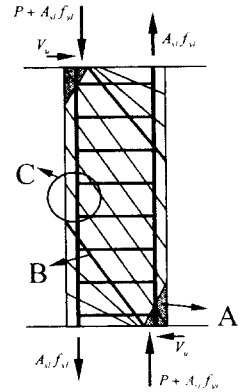


그림 3 기둥의 응력장 모델

3. 파괴강도 및 변형도 산정

3.1 전단파괴

기둥의 전단파괴는 파괴균열면에서 후프철근이 항복하면서 발생한다. 그림 4는 파괴균열면에서 수평 방향의 평형을 나타낸 그림으로 전단파괴시 강도로 작용하는 구성요소를 표현하고 있다. 즉, 철근에 의한 성분(V_s)과 균열면의 골재맞물림에 의한 성분(V_a), 그리고 균열이 생기지 않은 압축부로 직접 전달되는 트러스 액션에 의한 성분(V_{com})이 그것이다. 균열면의 골재맞물림에 의한 저항성분은 Collins⁽⁵⁾의 MCFT에 제안된 골재맞물림 응력을 이용하였는데 식 (3)에서와 같이 휨 변형에 증가하여 균열폭(w)이 확장될수록 작아진다. 또한 휨거동이 발전하면서 중립축이 압축영역으로 이동하여 압축 영역이 줄어들기 때문에 압축영역에서의 저항성분도 작아진다. 이러한 모델로부터 기둥의 전단강도는 다음식으로 표현할 수 있다. θ 는 균열면의 각도이고, 파괴 메커니즘에 따라 가정될 수 있다.

$$V_u = V_s + V_a + V_{com} \quad (1)$$

$$V_s = \frac{A_{sh} f_y j d}{\tan \theta} \quad (2)$$

$$V_a = \frac{1}{2} v_{ci} (j d) a, \quad v_{ci} = \frac{0.18 \sqrt{f'_c}}{0.3 + 24w / (a + 16)} \text{ (MPa, mm)} \quad (3)$$

$$V_{com} = V_u \frac{d - j d}{d}, \quad j d = \frac{d}{2} + \frac{V_u L - A_s f_y}{2(P + A_s f_y)} \quad (4)$$

상당한 휨변형 이후에는 V_a 는 0에 가까워 지고, V_{com} 은 중립축이 압축축 주근부 까지 이동함으로써 기둥에 가해진 압축력에 의한 영역정도가 남는다. 결국 충분한 연성거동을 하는 기둥인 경우 전단

강도는 V_{com} 의 잔류부분과 V_s 의 합으로 표현될 것이다.

여기서 V_a 와 V_{com} 은 파괴강도 V_u 가 결정되어 균열폭 w 와 중립축을 알아야 구할 수 있으므로 파괴강도 V_u 를 가정한 후, 4.3절 변형에서의 균열폭과 파괴강도가 균형을 이룰 때까지 반복(iteration)을 통해 파괴시 전단강도를 산정해야 한다.

3.2 부착파괴

대각선균열 발생이후 후프철근이 항복하지 않고 주기적인 횡하중이 증가될 때, 그림 5에서처럼 응력장의 T-T-C 절점에서는 주근과 콘크리트 사이의 부착응력이 커지게 된다. 이로 인해 주근을 따라 균열이 발전하는 부착파괴(splitting failure)가 발생한다. 주로 주기하중이 반복될 때 부착강도가 저하되어 나타나는 파괴양상으로 주근과 콘크리트 사이의 부착강도를 이용하면 기둥의 부착파괴강도를 구할 수 있다. 여기서 부착강도 U_y 는 단변형상과 구속조건에 의해 다르게 나타난다.

$$V_u = U_y \pi D_b d \cos \theta \quad (5)$$

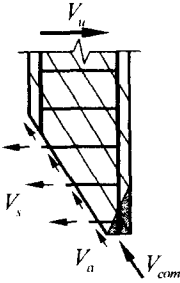


그림 4 전단파괴 양상

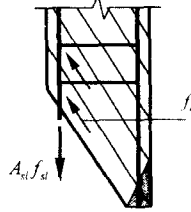


그림 5 부착파괴 양상

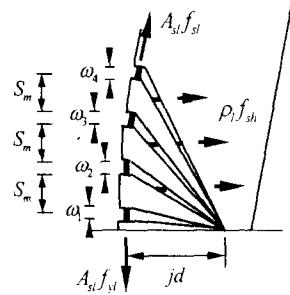


그림 6 휨 변형도 산정모델

3.3 휨-전단 파괴시 변형량 산정

파괴가 발생할 때의 변형량(θ)은 콘크리트를 강체로 가정해서 주근의 소성 변형과 중립축거리를 이용해 구해질 수 있다. 그림 3에서 부채꼴 응력장을 소성힌지 영역으로 가정하고 이 구간에서의 변형을 기둥의 변형으로 산정한다.

우선 주근의 인장변형을 그림 6의 변형모델을 이용해 산정한다. 주근을 따라 일정한 간격의 균열발생을 가정하고 각 균열에서 철근의 미끄러짐과 나온 철근의 변형을 이용해 소성힌지 영역에서의 주근의 변형을 구할 수 있다. Marti^[4]의 Tension chord model에서 부착응력과 미끄러짐 관계를 완전소성(rigid plastic)모델로 가정함으로써 인장부의 균열 간격(S_m)과 균열폭(w)을 결정하였다.

$$S_m = \frac{D f_{ct}(1 - \rho)}{2 \tau_{bo} \rho}, \quad \rho = \frac{A_s}{A_{c, eff}} \quad \tau_{bo} = f_{ct} \quad (6)$$

$$w = \frac{\lambda S_m (2 \sigma_s - \lambda \sigma_{sn})}{2 E_s} \quad (0.5 \leq \lambda \leq 1), \quad \sigma_{sn} = f_{ct} \left(\frac{1}{\rho} + n - 1 \right) \quad (7)$$

위식의 균열폭에서 σ_s 는 주근단부에서 f_y 이고 콘크리트 스트럿응력의 수직성분만큼 길이를 따라 감소한다. 부채꼴 응력장에서 콘크리트 스트럿에 작용하는 힘은 트러스 액션에서 후프철근에 작용하는

힘을 이용해 구할수 있는데 여기서 후프철근의 응력은 파괴시의 응력값으로 콘크리트의 인장성분이 고려되어 인장강화(tension-stiffened)되므로 f_y 이상일 수 있다. 따라서, 인장부의 변형은 콘크리트를 강체로 가정했을 때 소성힌지구간 내의 각 균열폭의 합으로 산정된다. 주근의 균열에서의 응력은 식 (9)에서의 콘크리트 스트럿힘 에 의해 식 (8)과 같다.

$$f_{s(1)} = f_y \cdot \dots \cdot f_{s(i)} = f_{s(i-1)} - f_{c(i)} \frac{i S_m}{\sqrt{(i S_m)^2 + jd^2}} \quad (8)$$

$$f_{c(i)} = \frac{f_{sh} A_{sh}}{s} S_m \frac{\sqrt{(i S_m)^2 + jd^2}}{jd} \quad (9)$$

따라서, 기둥의 변형(Θ)는 식 (7)에서 σ_s 에 $f_{s(i)}$ 를 대입함으로써 구해진 균열폭을 이용해 아래의 식을 얻을 수 있다. 여기서 n 은 소성힌지 구간내의 균열 개수로 정수를 취한다.

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{jd}, \quad n = \frac{jd \cot \theta}{S_m} \quad (10)$$

식 (10)에서 산정된 변형량은 최대강도에서의 변형량이며, 전단변형은 무시한다.

4. 결론

횡력이 작용하는 기둥에 대해 휨파괴, 전단파괴, 부착파괴의 세가지 파괴양상으로 분류하고 이를 설명할 수 있는 트러스 모델을 제시하였다. 모델은 실제 기둥에서 나타나는 거동을 근거로 응력장으로 표현되었고, 이를 이용하여 기둥의 최대전단강도와 부착파괴강도를 산정하였다.

부채꼴 응력장에서의 철근의 변형을 이용해 기둥의 최대 강도 발현시의 변형을 산정하였다. 이로써 전단파괴에 의해 취성적인 파괴양상을 보이는 기둥의 변형능력을 알 수 있었다. 이를 통해 구조물의 연성도 요구량을 효율적으로 확보하기 위한 토대가 마련될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 지진공학센터 99년도 제 3-2 연구과제(철근콘크리트 기둥의 전단강도)로 수행된 연구의 일부이며, 한국과학재단의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Ang, B. G., Priestley, M. J. N., and Paulay, T.(1989), "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns." ACI Structural Journal, Vol.86, No.1, pp.45-59
- 2) Wong, Y. L., Paulay, T. and Priestley, M. J. N., (1993), "Response of Circular Reinforced Concrete Columns to Multi-directional Seismic Atteck." ACI Structural Journal, Vol.90, No.4, pp.180-191
- 3) Priestley, M. J. N., Verma, R., and Xiao, Y.(1994), "Seismic Shear Strength of Reinforced Columns." Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No.8, pp.2310-2329
- 4) Marti, P., Alvarez, M., Kaufmann, W. and Sigrist, V.(1998), " Tension Chord Model for Structural Concrete." ETH
- 5) Collins, M. P. and Mitchell, D.(1991), "Prestressed Concrete Structures."