

철근콘크리트 기둥의 전단강도 산정을 위한 스트럿 타이 모델

Strut-and-Tie Model for Shear Strength of R/C Columns

이수곤*
Lee, Su-Gon

하태훈**
Ha, Tae-Hun

홍성걸***
Hong, Sung-Gul

ABSTRACT

Current design methods as well as the majority of the previous researches for shear strength of the reinforced concrete columns are based on empirical method. There is a need to propose the rational models based on analytical approach. This paper presents the modified strut-and-tie model for reinforced concrete columns, under axial compression, shear, and flexural moment, considering tensile strength of concrete. Using this model, the strength and the failure mode of R/C columns are investigated, and the proposed models are compared with test data available in the literature.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

철근콘크리트 구조체에서 기둥이 손상을 입으면, 부재 하나의 강성을 잃는 것 외에, 수직하중의 전달 능력을 잃게 되므로 매우 위험하다. 지진 등에 의해 구조체에 횡력이 가해지면, 기둥은 두 가지 양상으로 파괴가 발생한다. 첫째, 축력하에서 큰 휨 모멘트에 의해 일어나는 휨 파괴로 주로 장주의 단부에서 발생한다. 둘째, 축력하에서 큰 전단력에 의해 일어나는 전단파괴로 비교적 짧은 기둥에서 발생하는데, 이는 취성파괴의 양상을 띠어 급격히 건물을 붕괴에 이르게 한다. 본 연구는 취성파괴를 일으킬 수 있는 전단파괴의 양상에 초점을 두고, 적절한 모델링을 통해 기둥의 파괴 양상과 강도를 예측하고, 설계시 이용될 수 있는 강도식을 제안하려 한다.

1.2 연구방법

철근 콘크리트 기둥에 축력과 횡력이 동시에 작용하는 경우, 횡력에 저항하는 강도를, 콘크리트 인장력을 고려한 스트럿 타이 모델을 이용하여, 기둥의 형상과 기둥에 작용하는 수직하중, 그리고 재료의

* 서울대학교 건축학과 대학원

** 서울대학교 건축학과 대학원

*** 정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

강도에 대한 함수로 표현하였다. 그리고, 이를 Priestley 등의 실험 결과와 비교하여, 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 현행 규정

축력과 휨모멘트, 전단력이 함께 작용하는 철근 콘크리트 부재의 전단강도 V_n 은 ACI 318-95에서 45° 트리스 모델을 기초로 한 늑근에 의한 저항성분 V_s 와, 실험에 근거한 콘크리트의 저항성분 V_c 의 합으로 표현된다.⁽⁵⁾ 그러나, 실험결과에서 대각선 방향의 균열은 45° 보다 작아지게 되고, 이로 인해 늑근의 저항성분은 실제보다 작게 된다. 또한, 콘크리트의 저항성분도 실험값의 하한치를 사용하는 것이므로 실제보다 작은 값이 된다.

3. 스트럿 타이 모델에 의한 해석

3.1 모델링 및 가정

구조물에 횡하중이 작용하면, 기둥은 축력, 전단력, 휨 모멘트의 작용 하에 놓인다. 기둥길이를 따라 축력과 전단력은 일정하고, 휨 모멘트는 전단력의 크기에 따라 선형으로 변한다. 여기서, 모멘트가 0이 되는 점으로 기둥을 둘로 나누면, 그 중 길이가 긴 부분이 더 취약한 부분이 된다. 이 부분을 축력과 횡력이 작용하는 캔틸레버로 놓고 모델링 한다.

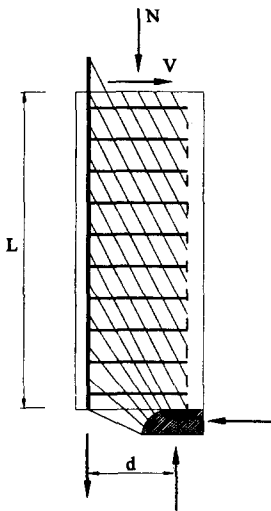


그림 1. 스트럿 타이 모델

지점(end point)으로부터 모멘트가 0이 되는 점까지의 길이 L 은 기둥의 전단길이(shear span)가 된다. 축력 N 은 고정된 값이며, 모멘트 M 은 전단력 V 와 전단길이 L 에 대한 함수, 즉 $M = VL$ 이 된다. 즉, 축력이 주어졌을 때, 기둥의 강도는 전단강도 V 만으로 표현될 수 있다.

그림 1. 은 이 기둥의 스트럿 타이 모델이다. 대각선 압축 스트럿의 각도는 주응력도를 이용하여 콘크리트가 처음으로 균열이 생기는 각도로 가정하고, 균열이 생긴 이후 압축 스트럿의 방향으로 힘을 전달하기 위해 필요한 압축력은 주근이 부담한다.

여기서 횡력에 저항하는 기둥의 강도는, 대각선 압축 스트럿이 콘크리트의 유효강도에 도달하거나, 주근 또는 늑근 중 하나가 항복할 때 작용하는 전단력으로 결정한다. 물론, 철근이 항복한 이후 기둥은 비탄성 거동을 하며 좀 더 저항하지만, 여기서는 고려하지 않기로 한다.

3.2 재료의 강도

① 콘크리트 대각선 압축 스트럿의 유효강도

콘크리트 일축 압축상태의 극한강도를 f'_c 이라고 할 때, 대각선 압축 스트럿의 강도는 압축력 직각방향의 평균 인장 변형도에 따라, 변화한다. 즉, 전단력의 크기에 따라 콘크리트 스트럿의 강도는 변화하게 되고, 이를 직접 해석에 적용하기 어렵다. 따라서, 콘크리트의 응력상태를 가정한 유효압축강도를 산정하여 이를 해석에 사용해야 한다. 본 논문에서는 Nielsen[1984;1]이 제안한 유효계수를 이용하기로 한다.⁽⁴⁾

$$f_c = \nu f'_c, \quad \nu = \left(0.7 - \frac{f'_c}{200}\right) \quad (1)$$

② 콘크리트의 인장응력

대각선 균열이 생기기 전까지 콘크리트의 평균 인장응력은 평균 인장변형도에 비례하고, 인장응력이 f_{cr} 에 도달해 균열이 생기면, 평균 인장응력은 급격히 줄어든다. 그리고, 균열면에서는 직접적으로 인장력을 전달시키지 못하고, 스트럿 사이의 골재등의 마찰력에 의해 전달되는데, 이 또한, 균열 폭이 증가함에 따라 인장력이 줄어든다.⁽¹⁾ 그러나, 해석시 콘크리트가 전달하는 인장력을 직접 적용하기 위해, 본 논문에서는 콘크리트의 인장강도 f_t 에 적절한 유효계수(=0.35)로 저감시켜 사용하기로 한다.

$$f_t = 0.35 f_{cr}, \quad f_{cr} = 0.7 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

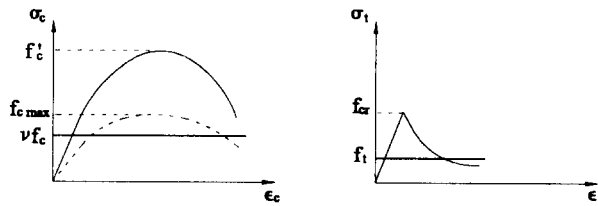


그림 2. 콘크리트의 압축강도와 인장강도

3.3 대각선 압축스트럿의 각도

대각선 압축스트럿의 각도는 주응력도(principal stress)를 이용하여 콘크리트의 인장응력이 인장강도 f_{cr} 에 도달할 때의 각도로 구해진다. 모멘트가 0인 지점에서 콘크리트는 그림 3.에서의 응력분포와 주응력을 가진다. 여기서, $\sigma = \frac{N}{bd}$, $\tau = \frac{V}{bd}$ 이며, Mohr Circle을 이용하면, σ_t 가 f_{cr} 에 도달할 때의 각도를 쉽게 구할 수 있다.

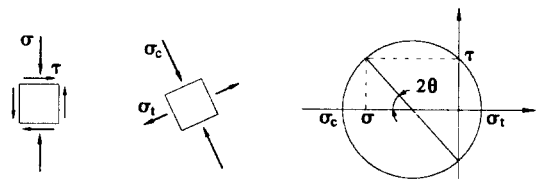


그림 3. 콘크리트의 응력상태와 그 때의 Mohr Circle

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sqrt{f_{cr}(\sigma + f_{cr})}}{\sigma} \right) \quad (3)$$

3.4 강도 산정

횡력에 저항하는 기둥의 강도는 대각선 압축 스트럿이 콘크리트의 유효압축강도에 도달하거나, 주근 또는 늑근이 항복할 때의 전단력 중 가장 작은 값으로 산정한다. 그리고, 파괴양상은 대각선 압축스트럿이 유효압축강도에 도달하거나, 늑근이 항복하는 경우를 전단 파괴, 주근이 먼저 항복할 경우를 휨파괴로 본다.

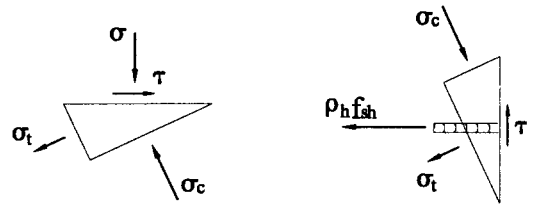


그림 4. 대각선 압축영역 미세요소의 응력 상태

① 파괴양상 1 : 대각선 압축스트럿 파괴 (V_1)

그림 4.(왼쪽) 에서 평형조건을 이용하면, 대각선 압축스트럿의 압축응력과 주어진 전단력과의 관계가 다음과 같이 성립한다.

$$\sigma_c = \frac{\tau}{\sin \theta \cos \theta} - f_t \quad (4)$$

여기에 압축스트럿의 압축응력에 유효압축강도를 대입하면 전단강도가 유도된다.

$$V_1 = (\nu f_c' + f_t) b d \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

② 파괴양상 2 : 늑근 항복 (V_2)

그림 4.(오른쪽) 에서 평형조건을 이용하면, 대각선 압축스트럿의 압축응력과 늑근의 인장응력 간의 관계가 다음과 같이 성립하며, 앞에서 구한 압축스트럿과 전단력과의 관계를 대입하면, 전단력과 늑근의 인장응력간의 관계식이 유도된다.

$$\frac{A_{sh} f_{sh}}{bs} = \left(\frac{\tau}{\sin \theta \cos \theta} - f_t \right) \sin^2 \theta - f_t \cos^2 \theta \quad (6)$$

여기서, 늑근의 인장응력에 항복응력(f_{ly})을 대입하면, 늑근 항복에 해당하는 전단강도가 산정된다.

$$V_2 = \left(\frac{A_{sh} f_{yh} d}{s} + f_t b d \right) \frac{1}{\tan \theta} \quad (7)$$

③ 파괴양상 3 : 주근 항복 (V_3)

그림 5. 는 주근에 작용하는 인장력을 나타낸 것으로, 콘크리트과의 평형조건에서 주근의 인장응력을 구할 수 있다. 그러나, 해석의 단순화를 위해, 기둥 단부에 형성되는 부채모양의 콘크리트 스트럿(fan)에 대해서는 대각선 압축스트럿과 평행한 각을 가진다고 가정한다. 이런 이유로 실제보다 조금 빨리 주근이 항복할 수 있을 것이다. 균열이 생긴 이후, 고정된 각의 콘크리트 스트럿으로 힘이 전달되기 위해서는 더 큰 압축력이 필요한데 이는 주근의 인장력을 이용해 전달되는 것으로 가정한다.

그림 5. 에서의 평형관계를 생각하면, 다음과 같은 식이 성립한다. 여기서, 콘크리트의 인장성분은 철

근의 인장강화(tension stiffening)로도 설명이 가능하다.

$$\frac{A_{st}f_{st}}{L+L'} = \left(\left(\frac{\tau}{\sin\theta\cos\theta} - f_t \right) \cos^2\theta - f_t \sin^2\theta \right) b \tan\theta \quad (8)$$

여기에 주근의 응력에 항복응력을 대입하고, 전단력 V 에 대해 정리하면, 주근이 항복할 때의 전단강도 V_3 가 구해진다. N' 은 단면에서 대각선 스트럿 압축력의 수직성분이며, 여기에 기둥에 실제 작용된 N 을 뺀 값이 철근이 휨모멘트에 의해 생긴 인장력 외에 생긴 인장 성분이 된다.

$$V_3 = \frac{A_{st}f_{st}d}{L+L'} + bdf_t \tan\theta, \quad L' = \frac{d(N'-N)}{2N' \tan\theta}, \quad N' = \frac{V}{\tan\theta} - f_t b d \quad (9)$$

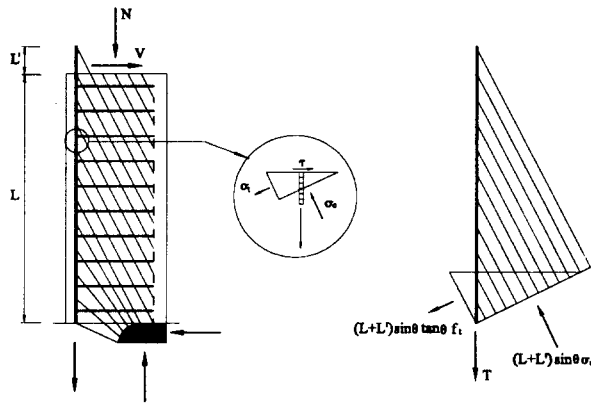


그림 5. 주근에 작용되는 인장력

4. 실험 자료와 비교

식(5), 식(7), 식(7)의 V_1, V_2, V_3 중, 가장 작은 값이 모델에서 기둥이 횡력에 저항하는 강도이다.

기존의 실험 자료를 근거로 모델의 타당성을 검증해 보기로 한다. 기둥의 전단강도에 대한 실험은 극히 드물며, 그마저도 교각과 같은 원형기둥에 대한 것들이 대부분이어서, 여기서는 원형기둥에 대한 실험자료를 ACI 318-95에서 규정한 등가 단면적으로 환산하여 비교하기로 한다.

Priestley 등[89]은 지름 40cm 원형기둥에 대한 실험을 많이 하였는데, 이 실험에서 기둥의 길이, 기둥에 작용하는 압축력, 주근과 늑근의 철근량 및 항복강도, 그리고, 콘크리트의 압축강도를 변화시키면서 기둥의 강도를 구했다.⁽³⁾ 이 자료를 이용해, 이 모델을 이용한 횡력에 대한 기둥의 강도를 검증하면 표 1.과 같다. 여기서, 주근의 단면적(A_{sv})은 기둥 단면 인장부 철근의 총 단면적이고, 늑근의 단면적(A_{sh})은 늑근 단면적의 두배이다. 그리고, 단위는 모두 (MPa, mm)이다.

표 1.에서, 대각선 압축스트럿이 유효압축강도에 도달해서 발생하는 파괴는 일어나지 않았고, 늑근이 먼저 항복하는 경우가 전단파괴로, 주근이 먼저 항복하는 경우가 휨파괴로 나타나는 파괴 양상은 실험과 일치한다. 그리고, 기둥의 강도는 실험에 의한 강도와 거의 일치한다. 그러나, V_2 와 V_3 의 차이가 커질수록, 즉 기둥의 전단강도와 휨강도의 차이가 커질수록 실험값과의 차이가 크게 나타나는데,

이는 철근이 항복한 후 콘크리트 대각선 압축스트럿의 각도가 변하는 비탄성 거동을 하며, 계속해서 횡력에 저항하기 때문일 것이다.

표 1. 구해진 전단강도와 실험값과의 비교

번호	$N/f_c A_g$	L	f'_c	A_{sh}	f_{vh}	S	A_{sv}	f_{vv}	θ	V_1	V_2	V_3	V_{ACI}	V_{exp}
1	0.2	800	28.7	56.5	372	30	2011	448	25.5	675	646	435	201	475
2	0.2	1000	29.9	56.5	372	30	2011	448	25.3	692	657	369	208	385
3	0.2	800	31.2	226	332	120	2011	448	25.1	709	628	442	216	450
4	0.2	800	29.9	56.5	372	60	2011	448	25.3	692	471	440	189	404
5	0.1	600	28.6	56.5	328	30	2011	436	31.3	770	471	493	176	527
6	0.1	800	36.2	56.5	326	30	2011	436	30.4	889	516	440	180	443
7	0.1	800	33.4	56.5	326	60	2011	436	30.7	848	369	433	176	379
8	0.1	1000	34.3	56.5	326	60	2011	436	30.6	862	374	383	180	329
9	0.1	600	35	56.5	326	60	2011	436	30.5	872	378	511	183	507
10	0.1	600	34.4	56.5	326	80	2011	436	30.7	848	337	508	174	436
11	0.175	700	36.7	56.5	326	80	2011	482	25.6	800	432	515	210	487

* 음영 표시는 실험에서 전단파괴가 일어난 시험체를, 진한 글씨는 모델에서 파괴가 발생하는 강도를 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 철근 콘크리트 기둥에 대해, 콘크리트의 인장력을 고려한 스트럿 타이 모델을 이용하여 휨거동과 전단거동이 서로 연관되는 모델을 제시하였다. 이전의 강도식에서, 부재의 전단강도를, 철근이 저항하는 성분과, 콘크리트가 저항하는 성분으로 나누어 표현한데 반해, 여기서는 두 성분이 서로 연관되어 나타나는 강도식을 제시하였다. 제안된 모델에 의한 결과를 기존의 실험 자료와 비교해 보았을 때, 기둥의 강도 및 파괴양상은 실험결과와 거의 일치했다. 다만, 항복 이후의 거동을 무시한 이유로, 연성파괴가 일어난 시험체에 대해, 실제보다 강도가 조금 작게 산출되었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학 연구센터 과제 3-2. 의 일환으로, 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. Collins, M.P., Mitchell, D. (1991), "Prestressed Concrete Structures." Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
2. ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion (1998), "Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete." Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No.12, pp.1374-1417
3. Ang, B. G., and Priestley, M. J. N., and Paulay, T. (1989), "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Column." ACI Structural Journal, Vol.86, No.1, pp.45-59
4. Nielsen, M.P. (1984), "Limit Analysis and Concrete Plasticity" Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
5. ACI Committee 318 (1995), "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-95)." American Concrete Institute, Farmington Hill, Mich