

보 소성힌지 변형을 고려한 RC보-기둥 접합부의 스트럿-타이 모델

Strut-and-Tie Models for Shear Strength of RC Beam-Column Joints Considering Deformation of Beam Plastic Hinge

이 수 곤* 홍 성 곁**
Lee, Soo Gon Hong, Sung Gul

ABSTRACT

This paper presents strut-and-tie models for predicting shear strength of RC interior beam-column joints considering the plastic hinge rotation of adjacent beams. On seismic design of frame system, it is controlled beams to occur plastic hinges and to be ductile so as to dissipate earthquake energy efficiently. The plastic hinge deformation of beams is used as analysis parameter in terms of strain of beam tensile bars at column face. The shear strengths of beam-column joints are evaluated by combining direct strut mechanism with truss mechanism. It is assumed that the max force transferred by direct strut mechanism is based on the strength of cracked concrete element, and that by truss mechanism is based on bond capacity.

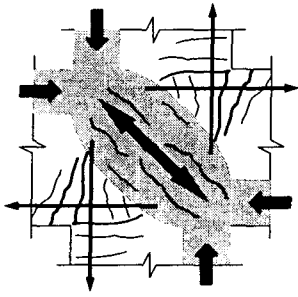
1. 서론

지진 등에 의해 구조물에 횡하중이 작용하면 보-기둥 접합부는 인접한 보나 기둥에 비해 매우 큰 전단력이 발생한다. 접합부의 파괴는 형태가 취성적이고 또한 구조물의 붕괴를 불러오므로 인접 부재 보다 강도를 크게 설계하도록 하고 있다. 지금까지의 연구에서 보-기둥 접합부의 전단력은 그림 1에 서와 같이 직접전달 메커니즘과 트러스 메커니즘으로 설명되어져 오고 있으나 정확한 역할 분담은 규명되어지지 않았으며, 현재 ACI 규준은 직접전달 메커니즘에 의해서만 강도를 결정하도록 하고 있다.

일반적인 프레임 구조물의 파괴메커니즘은 그림 2와 같다. 이러한 메커니즘에 따라 보-기둥 접합부의 인접한 보에 소성힌지가 발생하고 여기서 충분한 변형이 발생하도록 유도된다. 보-기둥 접합부의

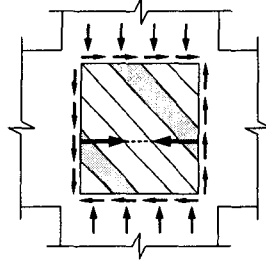
* 정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

** 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수



(a)

그림 1 보-기둥 접합부의 하중 전달 메커니즘 (a) 직접전달 메커니즘 (b) 트러스 메커니즘



(b)

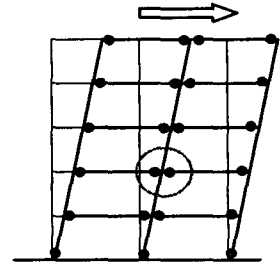


그림 2 일반적인 프레임 구조물의 횡하중에 대한 파괴 메커니즘

트러스 메커니즘은 보에서 연결되는 주근의 부착성능에 큰 영향을 받게 되고, 따라서 소성힌지의 변형이 클수록 부착성능이 떨어져서 보-기둥 접합부의 전단강도는 작아지게 된다.

본 논문에서는 직접전달 메커니즘과 트러스 메커니즘을 표현할 수 있는 스트럿-타이 모델을 제시하였다. 스트럿-타이 모델은 부재의 파괴 상태에서의 응력 흐름을 압축요소와 인장요소로 표현하여 평형조건만으로 파괴강도를 산정하는 소성학적 하한계 모델이다. 그러나 본 논문에서는 인접한 보의 변형량에 따른 하중전달 메커니즘의 변화와 접합부 강도의 변화를 표현하기 위해 적합조건 및 변형에 관한 단부조건을 고려하였다.

2. 보-기둥 접합부의 외부 조건

그림 3은 내부 보-기둥 접합부에 작용하는 하중 조건을 보여준다. h_b' 와 h_c' 는 각각 보와 기둥에서의 내부 팔 길이이고 a_b 와 a_c 는 보와 기둥의 압축대 길이이다. C_b , T_b , V_b 는 각각 보 단부에서 작용하는 압축력, 인장력, 전단력이고, C_c , T_c , V_c 는 기둥 단부에서 작용하는 압축력, 인장력, 전단력이다. 실제 좌우 보의 압축력의 중심과 인장력의 중심은 일치하지 않지만 편의상 일치한다고 가정하였다. 보에 소성힌지가 발생한다고 가정하면 $T_b = A_s f_y$ 가 된다. ACI 등의 규준에서 내진설계시에는 보의 강도증가를 가정하여 $T_b = 1.25 A_s f_y$ 로 설계하도록 하고 있는데 이는 강진에 대한 충분한 소성변형을 가정하였을 때의 값이라 할 수 있다. 따라서 보에서 작용하는 인장력은 $A_s f_y \leq T_b \leq 1.25 A_s f_y$ 인 범위 내에서 가정된 변형조건에 따라 정해져야 한다.

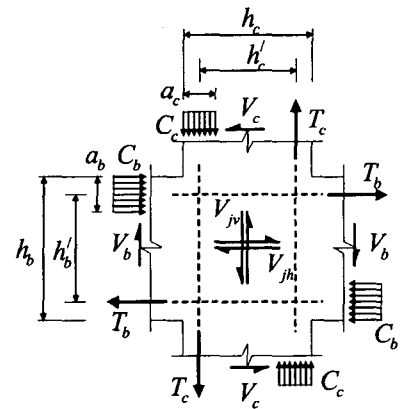


그림 3 보-기둥 접합부의 외부 하중

V_{jh} 와 V_{jv} 는 각각 보 기둥 접합부의 내부 수평 전단력과 수직 전단력으로 외부 하중에 의한 평형조건에 의해 다음과 같다.

$$V_{jh} = T_b + C_b - V_c \quad (1)$$

$$V_{jv} \approx \left(\frac{h_b'}{h_c'} \right) V_{jv} \quad (2)$$

3. 스트럿-타이 모델에 의한 해석

3.1 스트럿-타이 모델 구성 및 평형조건

그림 4는 보-기둥 접합부의 스트럿-타이 모델을 보여준다. 실선은 인장 타이 요소를, 점선은 압축 스트럿 요소를 나타낸다. 그리고 쇄선으로 표현된 요소는 절점부 N에서 전달되는 값에 따라 인장력 또는 압축력이 작용한다.

접합부의 내부 수평전단력은 대각선 스트럿 D_1 과 D_2 에 의해 전달된다. 여기서 스트럿 D_1 에 의한 값은 직접전달 메커니즘에 의한 전단력이며 스트럿 D_2 는 트러스 메커니즘에 의한 값이다. 따라서 접합부 내부의 수평전단력은 다음과 같다.

$$V_{jv} = (D_1 + D_2) \cos \theta \quad (3)$$

여기서 대각선 스트럿의 각도 θ 는 내부 압축 주응력 방향이지만 편의상 다음과 같이 가정하였다.

$$\tan \theta = \frac{h_b'}{h_c'} \quad (4)$$

절점부 N은 T-T-C(인장-인장-압축) 절점부로 대각선 스트럿(D_2)으로 하중을 전달하기 위해 보에서 연결된 철근의 부착력을 고려해야 한다. 절점부 N에서의 부착력 U는 다음과 같이 표현된다.

$$U = n\phi u l_n \quad (5)$$

여기서 n 과 ϕ 는 각각 보에서 접합부로 연결된 인장철근의 개수와 주장($\pi d_b^2/4$)이고, u 는 철근과 콘크리트 사이의 부착응력, 그리고 $l_n (= h_c' - a_c/2)$ 은 유효 부착길이 이다. 이에 따라 트러스 메커니즘을 구성하는 각 요소들의 하중은 부착력 U를 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_2 = U / \cos \theta \quad (6)$$

$$F_h = D_2 \cos \theta = U \quad (7)$$

$$F_v = D_2 \sin \theta = U \tan \theta \quad (8)$$

부착력 U는 철근의 인장 변형률에 대한 함수로 표현될 수 있고, 이에 따라 보의 소성힌지 변형이 클수록 부착력이 작아져서 트러스 메커니즘으로 전달되는 전단력이 작아진다.

3.2 항복 조건

제안된 모델의 강도를 결정하기 위해 구성된 각 요소의 파괴 조건을 결정해야 한다. 우선 직접전달 메커니즘의 대각선 스트럿 D_1 은 하중방향의 수직으로 균열이 발생한 콘크리트의 구성방정식을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 Vecchio등에 의해 제안된 수정압축장이론(MCFT)에 사용된 구성방정식을 이

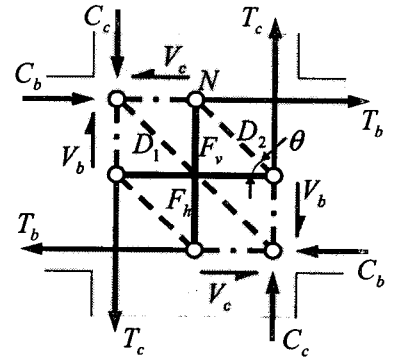


그림 4 보-기둥 접합부의 스트럿-타이 모델

용하였다.

$$\sigma_2 = f_{2,\max} \left(2 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_c'} \right) - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_c'} \right)^2 \right) \quad (9)$$

여기서, σ_2 과 ϵ_2 는 압축 응력과 압축 변형률이고, $f_{2,\max}$ 과 ϵ_c' 는 각각 최대응력과 최대응력시 변형률로 수정압축장이론에서 $f_{2,\max} = \frac{f_c'}{0.8+170\epsilon_1} \leq f_c'$, $\epsilon_c' = 0.002$ 를 취한다. 여기서, ϵ_1 은 압축력 방향과 수직 방향의 변형률이다. 본 논문에서는 강도만을 필요로 하므로 최대응력값을 이용해 대각선 스트럿 $D_{1,\max}$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D_{1,\max} = \sqrt{a_b^2 + a_c^2} b \frac{f_c'}{0.8+170\epsilon_1} \quad (10)$$

여기서, b 는 보-기둥 접합부의 유효 폭이며, ϵ_1 은 적합조건에서 구해진다.

트러스 메커니즘에 의해 전달되는 전단력의 최대값은 메커니즘을 구성하는 각 요소의 항복조건으로 표현할 수 있다. 즉 대각선 스트럿의 최대값 $D_{2,\max}$ 는 부착응력(u)이 부착강도(f_b)에 도달했을 때, 수직 또는 수평 철근이 항복했을 때의 하중 중 가장 작은값을 취하면 된다. 따라서 트러스 메커니즘에 의한 대각선 스트럿의 항복조건은 다음과 같이 표현된다.

$$D_{2,\max} = \text{the lowest of} \left(\begin{array}{l} U_y (= n\phi f_b l_n) \\ F_{hy} (= A_{sh} f_{yh}) \\ F_{vy} \tan\theta (= A_{sv} f_{yv} \tan\theta) \end{array} \right) \quad (11)$$

여기서, A_{sh} 와 f_{yh} 는 각각 접합부 내 수평 철근의 유효 면적과 항복강도이며, A_{sv} 와 f_{yv} 는 수직 철근의 유효면적과 항복강도이다. f_b 는 철근과 콘크리트 사이의 부착강도이다.

3.3 변형에 의한 단부조건 및 적합조건

부착강도(f_b)는 인접 보 주근의 변형률에 영향을 받는다. 그림 5는 보의 소성변형량에 따른 인장철근의 변형률, 응력, 그리고 부착응력을 보여준다. 보가 항복하기 이전상태(state i)와 항복한 이후(state ii), 그리고 충분한 소성변형 이후 slip에 의해 압축부 까지 철근에 인장력이 작용하는 상태(state iii)으로 나누어 표현했다. 탄성 상태에서의 부착강도 f_b 와 철근이 항복한 이후의 부착강도를 단순한 형태의 식으로 다음과 제안했다.

$$f_b = 2f_t \quad (\epsilon_{bs} \leq \epsilon_y) \quad (12)$$

$$f_b = \frac{f_b}{5} \left(9 \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{bs}} + 1 \right) \quad (\epsilon_{bs} > \epsilon_y) \quad (13)$$

여기서, f_t 는 콘크리트 인장강도이고, ϵ_{bs} 는 접합부와 접한 보 철근의 변형률이다.

균열이 발생한 콘크리트의 강도를 산정하기 위해 접합부 내부 균열방향의 수직방향 변형률을 구해야 한다. 다음과 같은 적합조건에 의해 ϵ_2 가 구해진다.

$$\epsilon_2 = \epsilon_y + (\epsilon_y - \epsilon_1) \cot^2 \theta \quad (14)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_x + (\epsilon_x - \epsilon_1) \tan^2 \theta \quad (15)$$

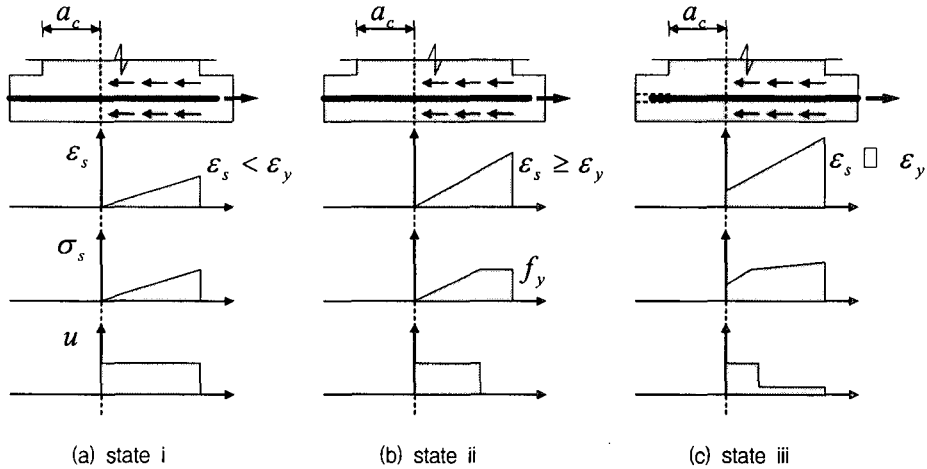


그림 5 접합부 내에서 보 철근에 작용하는 변형률, 응력, 부착응력 분포 (a) 보가 항복하기 이전 상태 (b) 보가 항복한 이후 (c) 보 철근 인장력이 압축대까지 발전해 slip이 발생한 상태

여기서, 접합부와 수평, 수직방향 변형률 ϵ_x 와 ϵ_y 는 외부 철근의 변형률을 이용해 다음과 같이 평균 변형률로 간단히 가정했다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{h_c} \left(\frac{\epsilon_{bs}}{2} (h_c - a_c) \right) \quad (16)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{h_b} \left(\frac{\epsilon_{cs}}{2} (h_b - a_c) \right) \quad (17)$$

여기서, ϵ_{bs} 와 ϵ_{cs} 는 각각 접합부와 접한 보와 기둥의 인장 철근 변형률이다.

4. 보-기둥 접합부의 설계법

일반적인 프레임 구조물의 내진 설계시 보-기둥 접합부의 설계는 다음과 같은 순서를 따를 수 있다.

Step 1 시스템의 파괴메커니즘 및 가정된 연성도에 의해 인접한 보의 소성변형량을 산정하고, 이에 따른 보 주근의 변형률(ϵ_{bs})을 산정한다.

Step 2 식 (13)에 따라 부착강도를 계산하고, 식 (11)을 통해 트러스 메커니즘에 의한 전단강도를 산정한다. 또한 식 (10) 및 (14)~(17)을 이용해 균열이 발생한 콘크리트의 압축강도를 구하고 직접전달 메커니즘에 의한 전단강도를 구한다. 보-기둥 접합부의 전단강도는 다음과 같다.

$$V_u = (D_{1,max} + D_{2,max}) \cos \theta \quad (18)$$

Step 3 식 (11)에서 부착에 의해 $D_{2,max}$ 가 결정되도록 수평 및 수직 보강근의 양을 결정한다. 만약 식 (18)의 전단강도가 접합부에 작용하는 수평전단력보다 작다면 접합부의 크기를 키워야 한다.

5. 결론 및 기대효과

보 소성힌지의 변형을 고려한 보-기둥 접합부의 강도를 산정할 수 있는 스트럿-타이 모델을 제안했

으며 이를 통한 설계법을 제시했다. 이에 따른 결론 및 기대효과는 다음과 같다.

- (1) 보의 소성 변형이 커질수록 트러스 메커니즘의 부착력이 줄어들어 직접전달 메커니즘에 의해 전달되는 전단력의 성분이 커진다. 현행 ACI 내진 기준에서 보-기둥 접합부의 전단강도는 직접전달 메커니즘만으로 표현하는 이유는 강진 지역에서의 안전성을 위한 것으로 우리나라와 같은 중진 지역에서는 보의 소성 변형량이 커지 않다는 가정 하에 트러스 메커니즘에 의한 전단력을 고려하는 것이 합리적이다.
- (2) 보-기둥 접합부의 강도는 보의 소성변형량에 의해 결정되지만 기존의 강도식은 평형관계만에 의해 산정되어 정확한 전단강도를 구할 수 없었다. 제안된 모델은 시스템의 연성도를 고려한 인접 보의 소성힌지 회전량을 변수로 두어 종전의 보-기둥 접합부 전단강도의 모호함을 해결했으며, 보 회전량의 변화를 통해 강진 뿐 아니라 중진이나 탄성 상태로 설계할 수 있는 약진에 대해서도 사용할 수 있는 설계 방법으로 사용할 수 있을 것이다.
- (3) 기존의 스트럿-타이 모델은 평형관계와 항복조건만으로 강도를 산정하는 모델이다. 여기에 변형단부 조건과 적합조건을 고려함으로써 소성변형에 의해 강도가 저하하는 부재에 대해서도 사용할 수 있는 강도 모델이 제안되었다. 이는 다양한 부재의 내진 설계에 적용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 지진공학연구센터(KEERC) 연구과제 “내진 콘크리트 구조물의 동적 스트럿-타이 모델”의 일환으로 수행되었음을 밝히며 자원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-98 / ACI 318R-98)”, American Concrete Institute, 1998, Farmington Hills, Michigan.
2. Pauley, T. and Priestley, M. J. N., “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building”, John Wiley & Sons, INC., 1992, pp. 250-302.
3. Hwang, S. and Lee, H., “Analytical Model for Predicting Shear Strengths of Exterior RC Beam-Column Joints for Seismic Resistance”, ACI Structural Journal, Vol.96, No.5, pp.846-857.
4. Hwang, S. and Lee, H., “Analytical Model for Predicting Shear Strengths of Interior RC Beam-Column Joints for Seismic Resistance”, ACI Structural Journal, Vol.97, No.1, pp.35-44.
5. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., “Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Element Subjected to Shear”, ACI Structural Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231.