

전단보강근이 배근된 외부 보기둥 접합부에 정착된 헤드 철근의 스트럿-타이 모델

Strut-And-Tie Model for Headed Bar Anchored in Exterior Beam-Column Joint with Transverse Reinforcement

천성철*

홍성걸**

오보환***

Chun, Sung-Chul Hong, Sung-Gul Oh, Bo-Hwan

ABSTRACT

This study presents a strut-and-tie model for the development of headed bars in an exterior beam-column joint with transverse reinforcements. The tensile force of a headed bar is considered to be developed by head bearing together with bond along a bonded length as a partial embedment length. The model requires construction of struts with biaxially compressed nodal zones for head bearing and fan-shaped stress fields against neighboring nodal zones for bond stresses along the bonded length. Due to the existence of transverse reinforcements, the fan-shaped stress fields are divided into direct and indirect fan-shaped stress fields. A required development length and head size of a headed bar can be optimally designed by adjusting a proportion between a bond contribution and bearing contribution.

1. 서론

철근 단부에 정착판을 부착한 헤드철근은, 기존 갈고리 정착을 대체하여 외부 보기둥 접합부와 같이 철근이 많아 배근 작업이 어렵고 콘크리트 충전성에 문제가 되는 부분에 적용될 수 있다. ACI 352-02¹⁾에서는 헤드철근의 정착길이를 갈고리 정착길이의 3/4로 규정하고 있으나, 실험결과에 근거한 설계식으로 이론적 근거가 빈약하다. ACI 352에 따르면 접합부 형상이나 정착판 치수의 영향을 고려하지 않으며, 재료강도에 의해서만 정착길이를 산정하고 있다.

본 논문에서는 전단보강근이 배근된 외부 보기둥 접합부에 보주근으로 정착된 헤드철근의 정착내력을 스트럿-타이 모델을 이용하여 도출하였다. 본 모델을 이용하여 접합부 형상, 정착판 치수 및 기둥 높이를 고려한 최적의 정착길이를 산정할 수 있다.

2. 전체 스트럿-타이 모델

그림 1은 외부 보기둥 접합부에서 헤드철근이 보 주근으로 사용된 경우에 헤드철근의 정착내력을 평가하기 위한 스트럿-타이 모델이다. 접합부를 포함하여 기둥에서 모멘트가 0이 되는 상하 기둥의 중심까지를 묘사한 것이다. 기둥면에서 보 모멘트는 내부 인장력과 압축력 P 로 표현될 수 있다. 모멘트 평형방정식에 의해 상하 기둥의 중심에서는 λP 의 기둥 전단력이 생기며, 접합부에는 $(1-\lambda)P$ 의 전

*정회원, 대우건설기술연구소 선임연구원

**정회원, 서울대학교 건축학과 교수

***정회원, 대우건설기술연구소 수석연구원

단력이 전달된다. 여기서, $\lambda=d/l_n$ 보의 춤과 상하 기둥간 거리의 비이다.

헤드철근에서 접합부로의 응력 전달을 묘사하기 위하여, 접합부의 응력상태를 4개의 스트럿과 1개의 타이로 구성하였다. 스트럿①은 정착판 전면의 지압력을, 스트럿②는 정착판에서부터 일정 구간의 부착력을 표현하고 있다. 스트럿①과 ②는 헤드철근으로부터 유발된 힘이 보의 압축응력 블록(절점 C)으로 직접 전달되는 직접 스트럿(direct struts)으로서, 스트럿①은 폭이 일정함에 비해 스트럿②는 부착력을 표현하기 위해 팬(direct fan)으로 표현될 수 있다. 타이⑤는 접합부 전단보강근을 표현하며, 스트럿③, ④와 더불어 헤드철근의 힘을 보의 압축응력 블록으로 전달하게 된다. 스트럿③과 ④는 스트럿②와 같이 부착력을 표현해야하므로 스트럿의 폭이 일정하지 않은 팬으로서, 헤드철근의 힘을 보 압축응력 블록으로 직접 전달하지 않는 간접 팬(indirect fan)이다.

헤드철근에서 접합부로 전달되는 응력만을 그림 1 우측 하단에 표현하였다. 절점 C에서의 모멘트 평형방정식을 세우면, 식 (1)과 같다.

$$\sum M_c = 0; (1-\lambda)Pd_c = C_1d_1 + C_2d_2 + C_3d_3 + T_5 \frac{d_c}{2} \quad (1)$$

3. 접합부 스트럿-타이 모델

3.1 기본 가정

접합부의 응력은 평면응력상태로 가정하고, 모든 재료는 변형경화를 고려하지 않는 완전 탄소성 거동을 가정한다. 모델의 단순화를 위해 보 전단력은 생략하였다. 강기둥-약보의 설계 개념에 따라 기둥철근은 항복하지 않으며, 기둥 철근의 부착응력도 항복하지 않는다.

헤드철근의 힘 P 는 기둥 전단력(column shear) λP ,와 접합부 전단력(joint shear) $(1-\lambda)P$ 로 나뉜다. 헤드철근에서 기둥과 접합부로 전해지는 지압력과 부착력은 $\lambda:(1-\lambda)$ 의 비율로 기둥과 접합부로 전달된다. 보 압축응력 블록에 작용되는 응력은 극한상태에서 유효압축강도(f_{cu})에 도달한 것으로 가정한다.

3.2 항복조건

헤드철근의 정착내력을 평가하기 위해, 헤드철근과 직접 맞닿은 절점이 항복한다. 즉 헤드 전면의 지압력이 유효압축강도(f_{cu})에 도달하고, 부착응력은 항복 부착강도(U_p)에 도달한다. 헤드철근과 기둥철근은 항복하지 않는다.

3.3 스트럿과 타이의 형상과 평형 조건

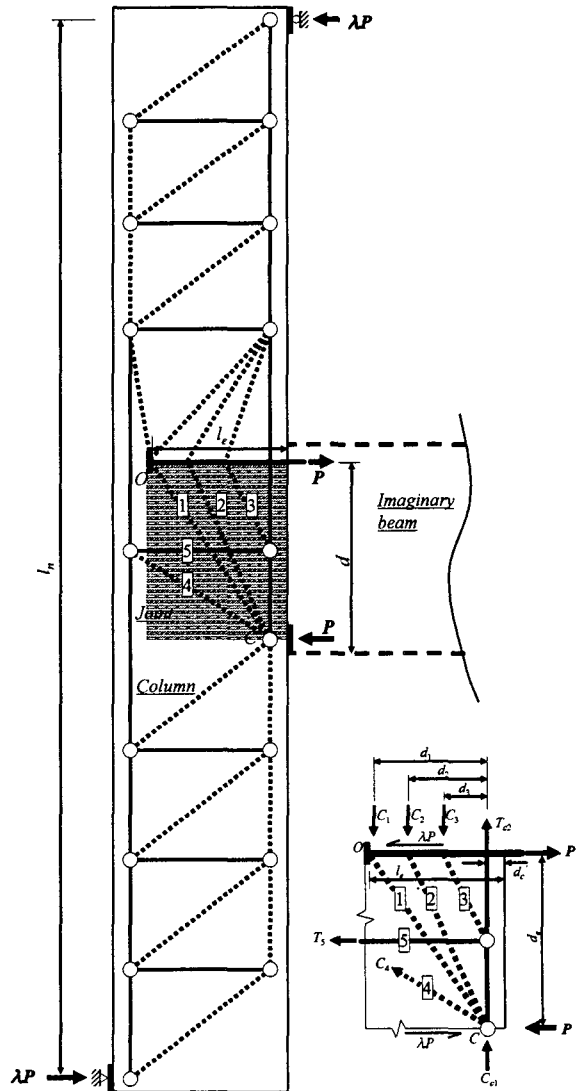


그림 1 보기둥 접합부의 스트럿-타이 모델

스트럿(1)~(4)과 타이(5)는 각 절점에서 힘의 평형방정식을 만족해야한다. 힘의 평형과 3.2절의 항복조건을 이용하여 스트럿과 타이의 힘을 구할 수 있으며, 절점의 치수 및 항복 상태도 결정된다.

3.3.1 타이(5)

접합부 전단내력은 콘크리트와 전단보강근으로 구성되는데, 이중 전단보강근의 기여분 T_5 와 작용구간 l_c 는 FIP Recommendation²⁾에 따라 식 (2)와 같다.

$$T_5 = \frac{2d_e/l_e - 1}{3}(1-\lambda)P = \frac{2\alpha - \rho - 1}{3}(1-\lambda)P;$$

$$l_c = (0.85\alpha - 0.425\rho - 0.25)l_e \quad (2)$$

여기서, $\alpha=d/l_e$ 접합부 형상비이며, $\rho=P/(f_{cu}Bl_e)$ 무차원 헤드철근 정착내력이다.

타이(5)가 연결되는 절점은 기둥철근의 부착력과 간접 팬(indirect fan)인 스트럿(3)과 (4)가 만나는 TU 와 $T'U'$ 구간이다. TU 와 $T'U'$ 구간에서 x 방향 응력은 균일하다($-\sigma_{xs}=T_5/l_c$).

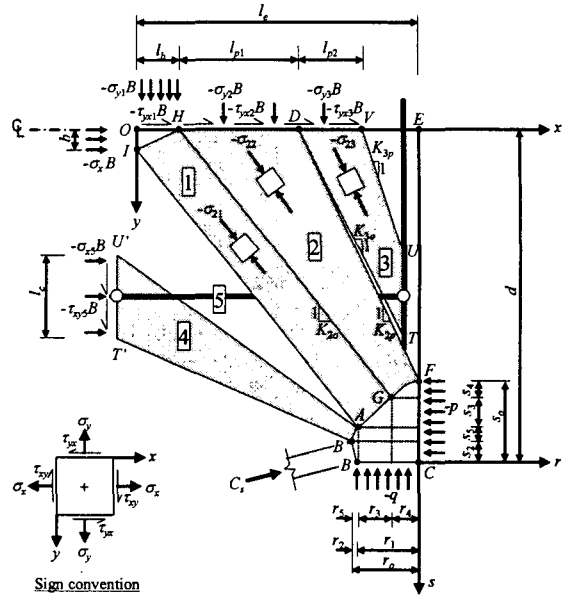


그림 2 접합부의 응력 상태와 치수

3.3.2 스트럿(1)

헤드전면의 지압력에 의해 형성되며, 3.1절의 가정과 3.2절의 항복조건에 따라 스트럿(1)이 연결되는 양 절점의 응력이 유효압축강도에 도달했으므로($-\sigma_x = -\sigma_{y1} = f_{cu}$), 스트럿(1)의 주응력은 유효압축강도에 도달한다($-\sigma_{21} = f_{cu}$). 스트럿(1)의 각도(K_{20})와 절점의 치수는 식 (3)과 같다.

$$s_3 = 2(1-\lambda)\beta l_e; r_3 = \frac{s_3}{K_{20}} = \frac{2(1-\lambda)\beta l_e}{K_{20}}; K_{20} = \frac{l_e - l_b - r_4}{d - s_2 - s_3 - s_5} \quad (3)$$

여기서, $\beta=b/l_e$, $b=A_{nh}/(2B)$ 등가 유효 정착판 치수, A_{nh} 는 정착판 순 단면적, B 는 보주근 간격 또는 부재 두께, K_{20} 는 AI 또는 GH 기울기이다.

3.3.3 스트럿(2)

헤드철근의 부착력 중 보 압축응력 블록으로 직접 전달되는 힘을 표현한다. 3.2절의 항복조건에 의해 극한상태에서 DH 구간의 부착력은 항복한다($U=U_p$). DH 구간의 응력과 스트럿(2)의 주응력은 부착력의 항복조건과 응력을 산정하는 위치(x)에 의해 구할 수 있다. ($-\tau_{xy2}=(1-\lambda)U_p/B$; $-\sigma_{y2}=(1-\lambda)U_p/(BK_2)$; $K_2 = (r+l_e-x)/(s+d)$; $-\sigma_{22} = (1-\lambda)U_p(K_2^2+1)/(BK_2)$). D 점의 위치를 알면, 부착길이 l_{p1} 이 결정되어 스트럿(2)가 헤드철근의 정착내력에 기여하는 정도를 구할 수 있다. 힘의 평형방정식과 경계조건(GH , DF 구간)을 이용하여 D 점의 위치를 구하기 위한 지배방정식 (4)를 세울 수 있다.

$$\frac{(1-\lambda)\gamma}{\sqrt{1-4(1-\lambda)^2\gamma^2}} \ln \left[\left(\frac{K_{2p} - K_{max}}{K_{20} - K_{max}} \right)^{K_{max}} \left(\frac{K_{20} - K_{min}}{K_{2p} - K_{min}} \right)^{K_{min}} \right] + \ln \left[\frac{\alpha - \rho}{\alpha - \rho + (1-\lambda)\{(4 + \rho - 2\alpha)\rho/3 - 2\beta\}} \right] = 0 \quad (4)$$

여기서, $\gamma=U_p/(f_{cu}B)$ 부착강도비, $K_{max}=[1+\sqrt{1-4(1-\lambda)^2\gamma^2}]/\{2(1-\lambda)\gamma\}$, $K_{min}=1/K_{max}$, K_{2p} 는 DF 기울기이다.

3.3.4 스트럿(3)

헤드철근의 부착력 중 접합부 전단보강근에 의해 간접적으로 보 압축응력 블록으로 전달되는 힘이

다. 타이[5]와 수평방향으로 힘의 평형을 이루어야하므로, TU 구간의 수평방향 응력은 3.3.1절의 $-\sigma_{s5}$ 와 같다. DV 구간의 부착력은 스트럿[2]와 마찬가지로 항복하기 때문에, DV 구간의 길이는 타이[5]의 힘을 항복 부착력으로 나누어 구할 수 있다($l_{p2} = T_5 / ((1-\lambda)U_p) = ((2\alpha-1-\rho)\rho l_e) / (3\gamma)$). V 점의 위치를 알면, 부착 길이 l_{p2} 를 이용하여 스트럿[3]의 형상을 결정할 수 있다. V 점의 위치는 UV 의 기울기가 최소 기울기와 같다는 조건을 이용하여 식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$K_{3p} = \frac{\delta - 2(1-\lambda)\beta/K_{2o} - (1-2\lambda)\beta K_{2o} - (\rho - 2\beta)/\gamma}{0.075\alpha - 0.037\rho + 0.125} = K_{\min} \quad (5)$$

여기서, $\delta = (l_e - d_c) / l_e$ 이다.

3.3.5 스트럿[4]

타이[5]의 힘을 보 압축응력 블록으로 전달하는 역할을 한다. $T'U'$ 구간 수평방향 응력은 스트럿[3]의 TU 구간과 동일하며, 수직 방향 응력은 스트럿의 각도에 따라 결정된다. 수평방향 힘의 평형에 의해 s_5 의 치수를 결정할 수 있으며, 스트럿의 각도를 이용해 r_5 도 구해진다. 이를 이용하여 스트럿[4]의 형상이 결정된다.

3.4 헤드철근의 정착내력

식 (1)의 모멘트 평형 방정식을 3.3절에서 결정된 치수와 응력으로 다시 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\rho \left(\alpha - \frac{\rho}{2} \right) = \frac{2}{K_{2o}} \beta \left(\delta - \frac{1-\lambda}{K_{2o}} \beta \right) + \frac{s_4}{(1-\lambda)l_e} \left(\alpha - \rho + \frac{s_4}{2l_e} \right) + \frac{r_4}{(1-\lambda)l_e} \left(\frac{r_4}{2l_e} - 1 + \delta \right) + \rho \frac{2\alpha - \rho - 1}{3} \left(\alpha - \frac{\rho}{2} \right) \quad (6)$$

3.3절에서 구한 치수와 응력을 이용하여, 식(4), (5), (6)을 연립해서 풀면 미지수 K_{2o} , K_{2p} , ρ 를 산정할 수 있다. 헤드철근의 정착내력은 ρ 의 정의를 통해 구해진다.

4. 결론

전단보강근이 배근된 외부 보기등접합부에서, 보 주근으로 정착된 헤드철근의 정착내력 산정을 위한 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 본 모델을 이용하여, 헤드철근에서 접합부로 힘의 전달과 접합부 내의 응력상태를 설명할 수 있다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 스트럿-타이 모델을 이용하여, 헤드철근에서 접합부로 힘의 전달을 정착판의 지압력과 정착길이의 부착력으로 명확히 설명할 수 있다. 지압력은 극한상태에서 유효압축강도에 도달하게 되는 균일한 폭을 지니는 스트럿으로 묘사할 수 있으며, 부착력은 양단 절점의 폭이 변하는 팬으로 묘사할 수 있다.
- (2) 부착력에 의해 형성되는 팬은 헤드철근에서 보 압축응력 블록으로 직접 전달되는 직접 팬(direct fan)과 전단보강근을 통해 간접 전달되는 간접 팬(indirect fan)으로 나뉜다. 간접 팬은 전단보강근에 의해 형성되며, 그 기여정도는 접합부의 높이와 헤드철근의 정착길이 비에 따라 결정될 수 있다.
- (3) 헤드철근의 정착내력은 접합부 내부 응력의 평형방정식과 기둥의 내부응력을 고려한 모멘트 평형 방정식에 의해 구할 수 있다.
- (4) 지압력과 직접 팬 및 간접 팬의 정착내력에 대한 기여분을 조절함으로써, 헤드철근의 설계내력 발현을 위한 최적 정착길이와 정착판 순 단면적을 설계할 수 있다.

참고문헌

- 1) ACI-ASCE Committee 352, "Recommendation for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352-02)," American Concrete Institute, 37 pp.
- 2) FIP Recommendation, "Practical design of structural concrete," Sep. 1999, 113 pp.
- 3) Sung-Gul Hong, Sung-Chul Chun, and Bohwan Oh, "Evaluation of Anchorage Strength of Headed Bar in Exterior Beam-Column Joint Using Strut-And-Tie Model," 2nd fib Congress, Naples, Italy, June, 2006