

### 4.3 복근직사각형보의 해석

#### 4.3.1 복근배근의 필요성

$\phi M_n$ 을 증가시키는 방법

- ① 강도  $f_y$  와  $f_{ck}$ 를 증가 시킴
- ② 단면의 치수  $b$ 와  $d$ 를 키움
- ③ 철근비  $\rho$ 를 증가시킴

재료가 정해져 있고, 단면의 크기도 제한되어 있는데, 소요강도( $M_u$ )이 크면 그에 따라 요구되는 인장철근량도 증가하게 되며, 그때의 철근비가 최대철근비를 초과한다고 가정하자. 이 철근량을 그대로 인장측에 배근하면 이 보는 압축측 콘크리트가 먼저 파괴되는 취성파괴거동을 보일 것이다. 압축철근을 사용하면 사용된 압축철근이 지지하는 압축력만큼 인장철근이 지지하는 인장력과 평형을 이루므로 콘크리트의 압축측과 평형을 이루는 인장철근의 철근비를 낮출수 있고, 따라서 **인장철근비를 최대철근비 이하로 유지하면서 설계강도를 높일 수 있다.**

※ 압축철근의 배근으로 인한 추가적인 구조적 장점

① **장기처짐의 감소** : 압축철근이 압축측 콘크리트의 **건조수축** 및 **크리프** 등이 일어나는 것을 제약하므로 결과적으로 장기처짐이 감소한다.

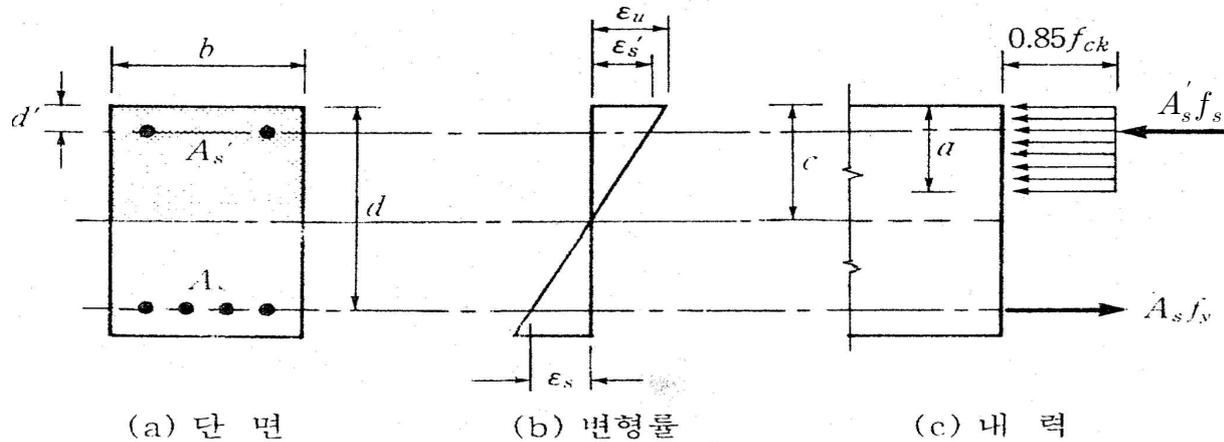
② **연성의 증진** : 앞에서 제시된 단근보의 등가응력블럭깊이  $a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$  식은 복근보

에서는  $A_s$  가  $(A_s - A_s')$ 으로 대치되므로 콘크리트의 압축응력블럭깊이가 줄어들고 인장철근의 변형도가 증가하여 보의 연성이 증가하게 된다. 이러한 연성의 증가는 내진구조나 모멘트의 재분배가 일어나는 경우 구조체의 안전성을 높이는데 매우 중요한 기능을 한다.

③ **철근 조립의 편리** : 보의 철근조립에서 압축철근을 배근하면 스트립설치와 피복두께 유지에 편리하다. 따라서 구조내력상 압축철근이 필요하지 않은 경우에도 압축측의 양 모서리에 압축철근을 배근하는 것이 일반적인 관례가 되고 있다.

## 4.3.2 복근보의 설계강도

복근보도 단근보의 경우와 같이 극한상태에서 콘크리트의 압축 단부의 변형률은 0.003, 인장철근의 응력은  $f_y$ 에 도달하는 것으로 가정하며, 이때 압축철근의 변형률  $\epsilon_s'$ 가  $\epsilon_y$ 에 도달하여 항복하는 경우와  $\epsilon_y$ 보다 작아서 항복하지 않는 경우에 따라 공칭강도를 구하는 식이 다르다.



1) 힘의 평형관계식

$$T = C_c + C_s \quad \Rightarrow \quad A_s f_y = 0.85 f_{ck} ab + f_s 'A_s '$$

가) 압축철근이 항복하지 않는 경우 ( $f_s' = E_s \varepsilon_s'$ )

나) 압축철근이 항복하는 경우 ( $f_s' = f_y$ )

2) 압축철근의 항복여부 판단

$$\varepsilon_s' = \frac{c-d'}{c} \times 0.003$$

$\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$  : 압축 철근 항복 경우  $\rightarrow$  a값 유효

여기서,  $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ ,  $E_s = 200,000MPa$ ,  $f_y = 400MPa$ ,  $\varepsilon_y = 0.002$

$$\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y \Rightarrow \frac{c-d'}{c} \times 0.003 \geq 0.002 \Rightarrow c \geq 3d' \Rightarrow a \geq 3\beta_1 d' \approx 2.55d'$$

따라서 압축철근이 항복하는 조건은

$$\therefore c \geq 3d' \quad \text{or} \quad a \geq 2.55d'$$

3) 압축철근이 항복하는 경우의 공칭강도 산정  
인장철근 항복시 압축철근이 동시에 항복

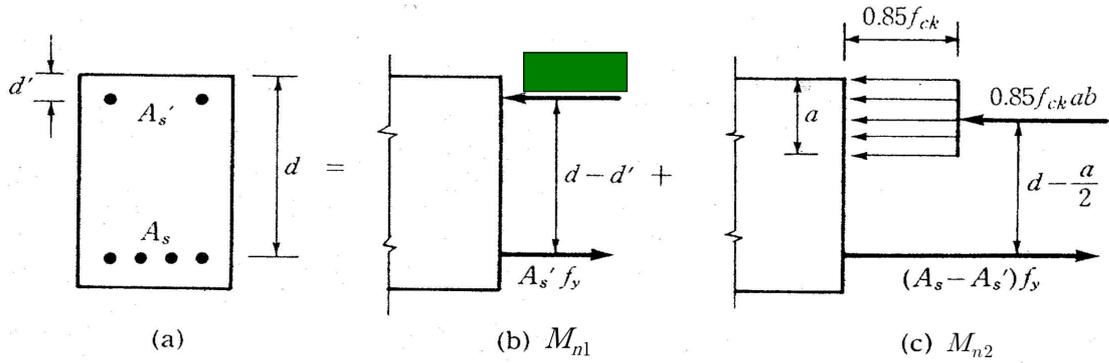
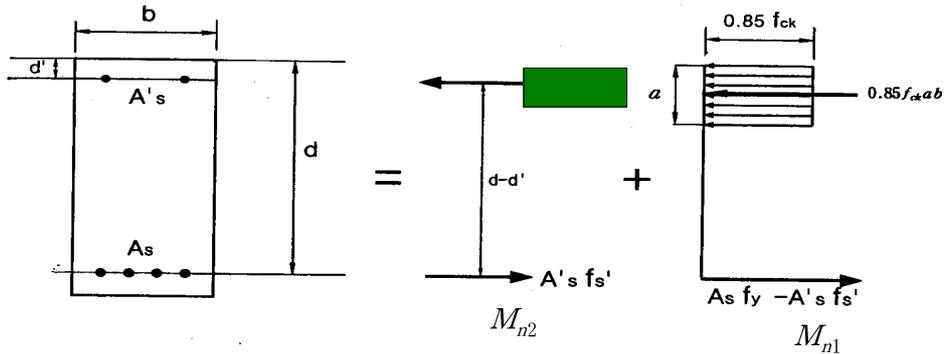


그림 4.11(a) 압축철근 항복시의 복근보 내력

4) 압축철근이 항복하지 않을 경우의 공칭강도 산정 ( $\rho < \rho_{lim}$ )

: 인장철근 항복시 압축철근은 항복하지 않음



(a) 복근 장방형보의 단면

(b)  $A's'$ 에 의한 힘의 평형

(c)  $(A_s - A's')$ 에 의한 단근 장방형보

그림 4.11(b) 압축철근 항복하지 않을 경우의 복근보 내력

[예제 4-3] 그림 4-8(a)와 같은 직사각형 복근보의 설계강도를 계산하라. 콘크리트의 압축강도  $f_{ck} = 21 \text{ MPa}$  이고 철근의 항복강도는  $f_y = 40 \text{ MPa}$ 이다.

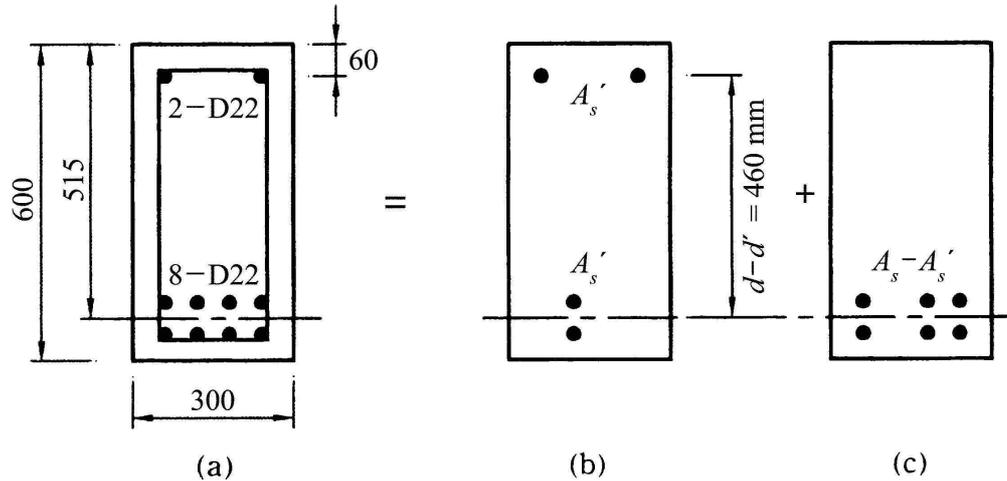


그림 4-9 예제 4-2의 복근보

[풀이]

인장측만 보강되었을 때의 철근비  $\rho = \frac{8 \times 387.1}{300 \times 515} = 0.0200$

표 4-1에서  $f_{ck} = 21 \text{ MPa}$ ,  $f_y = 400 \text{ MPa}$ 일 때  $\rho_{\max} = 0.0163 < \rho = 0.0200$ 가 되나,  
2-D22 철근이 압축 측에 보강된 경우, **유효철근비**는

$$(\rho - \rho') = \frac{(8 - 2) \times 387.1}{300 \times 515} = 0.0150$$

으로  $\rho_{\max}$  보다 낮은 값을 유지할 수 있다.

압축철근의 항복여부를 검토하기 위하여 압축철근이 항복한 것으로 가정하면,

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_{ck} b} = \frac{(8 - 2) \times 387.1 \times 400}{0.85 \times 21 \times 300} = 173.5 \text{ mm}$$

식(4.22)에서

$$\frac{0.85 \times 60}{(1 - 400/600)} = 153 \text{ mm} < a \text{ or } 2.55 \times 60 = 153 \text{ mm} < a$$

이므로 처음 가정한 바와 같이 **압축철근은 극한상태에서 항복한다.**

따라서 식 (4.26)으로부터 공칭모멘트는

$$\begin{aligned} M_n &= A_s' f_y (d - d') + (A_s - A_s') f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) \\ &= 2 \times 387.1 \times 400 \times (515 - 60) \times 10^{-6} + (8 - 2) \times 387.1 \times 400 \times \left(515 - \frac{173.5}{2}\right) \times 10^{-6} \\ &= 538.8 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

설계강도는

$$\phi M_n = 0.85 \times 538.8 = 458.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

[예제 4-4] 예제 4-3의 보에서 압축철근을 2-D22 대신 4-D22를 사용할 때의 설계강도를 계산하라.

[풀이]

압축철근의 항복 여부를 검토하기 위하여 압축철근이 항복한 것으로 가정하면,

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_{ck} b} = \frac{(8 - 4) \times 387.1 \times 400}{0.85 \times 21 \times 300} = 116 \text{ mm}$$

식 (4.22)에서

$$\frac{0.85 \times 60}{(1 - 400/600)} = 153 \text{ mm} > a \quad \text{or} \quad 2.55 \times 60 = 153 \text{ mm} > a$$

따라서 극한상태에서 압축철근은 항복하지 않으므로 식 (4.28b)로  $a$ 를 계산한다.

$$(0.85 \times 21 \times 300) a^2 + (600 \times 4 \times 387.1 - 8 \times 387.1 \times 400) a - 600 \times 4 \times 387.1 \times 0.85 \times 60 = 0$$

$$\therefore a = 127 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = \frac{a - \beta_1 d'}{a} \times 0.003 = \frac{127 - 0.85 \times 60}{127} \times 0.003 = 0.0018$$

$$C_s = (200,000 \times 0.0018 \times 4 \times 387.11 \times 10^{-3}) = 557.4 \text{ kN}$$

$$C_c = 0.85 \times 21 \times 127 \times 300 \times 10^{-3} = 680.1 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} M_n &= C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \\ &= 680.1 \times (515 - 127/2) + 557.4 \times (515 - 60) \\ &= 560,682 \text{ kNmm} = 560.7 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\phi M_n = 0.85 \times 560.7 = 476.6 \text{ kNm}$$

#### 4.5 연속 휨부재의 모멘트 재분배

- 연속보나 2경간 이상 연속된 1방향 슬래브.
- 연속 휨부재에 작용하중이 증가하면, 정모멘트나 부모멘트 보강 철근 중 어느 한 부분이 먼저 항복하며, 철근이 항복한 부위는 소성힌지가 발생하여 더 이상 휨 저항 능력을 발휘하지 못하나, 탄성 상태로 남아 있는 부분의 철근은 휨저항 능력을 갖고 있다.
- 추가 하중이 작용하면 소성힌지가 발생한 부분의 모멘트는 소성모멘트를 유지하면서, 탄성 상태인 부분의 모멘트가 증가하게 된다.
- 이와 같은 현상을 소성거동에 의한 모멘트의 재분배라 한다.
- 모멘트 재분배는 소성힌지가 생기는 부분에서 충분한 비탄성변형이 가능한 경우에만 가능하다. 인장 철근비가 낮을수록 콘크리트의 소성거동에 필요한 연성, 즉 비탄성변형 능력이 확보된다.
- 설계기준 3.4.2 모멘트 재분배 규정
  1. 모멘트의 재분배는 휨모멘트를 감소할 단면의 최외단 인장철근의 순인장변형률  $\epsilon_t$ 가 0.0075이상인 경우에만 가능하다.
  2. 연속 휨부재 받침부의 모멘트는 20퍼센트 범위에서  $1000\epsilon_t$ 퍼센트만큼 증가 또는 감소시킬 수 있다.

## 4.6 T형보의 해석

보-슬래브 구조에서는 시공의 성질상 **보와 슬래브의 콘크리트가 동시에 타설**되기 때문에 경화 후 **일체**가 되어 그림 4.12에 표시된 바와 같이 **보와 인접한 슬래브는 보의 플랜지를 이루어** 보의 강성을 높이고 압축응력을 지지하는 면적을 넓혀준다. 이러한 형태의 보를 **T형보**라고 한다.

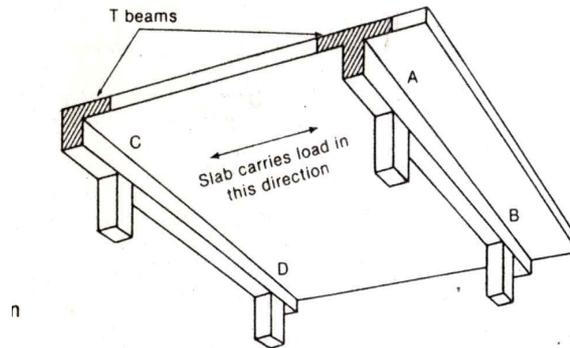


그림 4-9 보-슬래브 구조에서 T형보 부분

→ T형보는 보의 모든 부분에 다 적용되는 것은 아니고, 휨에 의해 슬래브가 압축측이 되는 보의 중앙부분에만 적용이 가능하며, 인장을 받는 보의 단부에서는 직사각형보로 설계되어야 한다.

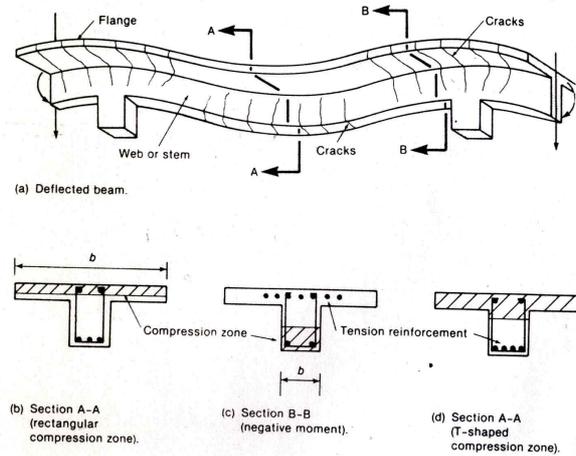
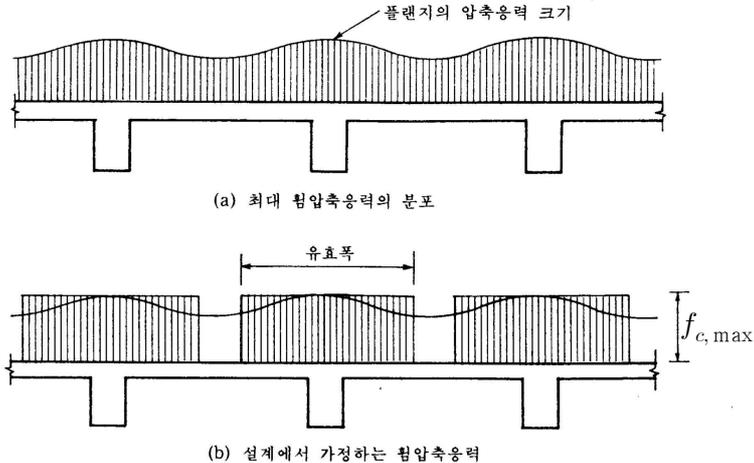


그림 4.13 T형보의 변형 및 각 위치에서의 응력상태

4.6.2 T형보의 유효폭 : 하중형태, 지지조건, 보의 간격, 보와 슬래브의 상대강성 등에 영향을 받는다. 휨모멘트에 의한 압축응력의 분포는 그림 4.14에 나타난 것과 같이 보에 인접한 부분에서는 압축응력을 많이 받으나 보에서 멀어질수록 지지하는 압축응력의 크기는 감소한다. 이러한 압축응력의 분포를 최대 압축응력  $f_{c, \max}$ 가 일정하게 작용하는 것으로 바꾸어 놓았을 때 그 폭을 유효폭이라고 한다.



※ T형보 유효폭의 규정

(1) 보의 양쪽에 슬래브가 있는 경우

- 보 경간의  $1/4$  ( $\frac{1}{4}l$ )
- 슬래브 두께의 16배에 보의 복부 폭을 더한 값 ( $16h_f + b$ )
- 양측 슬래브의 중심간 거리

(2) 보의 한쪽에만 슬래브가 있는 경우

- 보 경간의  $1/12$ 에 보의 복부 폭을 더한 값
- 슬래브 두께의 6배에 보의 복부 폭을 더한 값
- 인접 보와의 내측 거리의  $1/2$ 에 보의 복부 폭을 더한 값

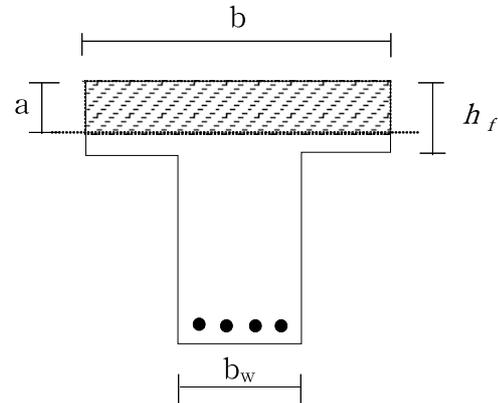
## 4.6.3 T형보의 설계강도

(1) 공칭강도  $M_n$ 의 산정①  $a < h_f$  일 경우

\* 유효폭  $b$  인 단근직사각형보로 설계

\*  $a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$  를 그대로 사용

$$\therefore M_n = A_s f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$



②  $a > h_f$  인 경우

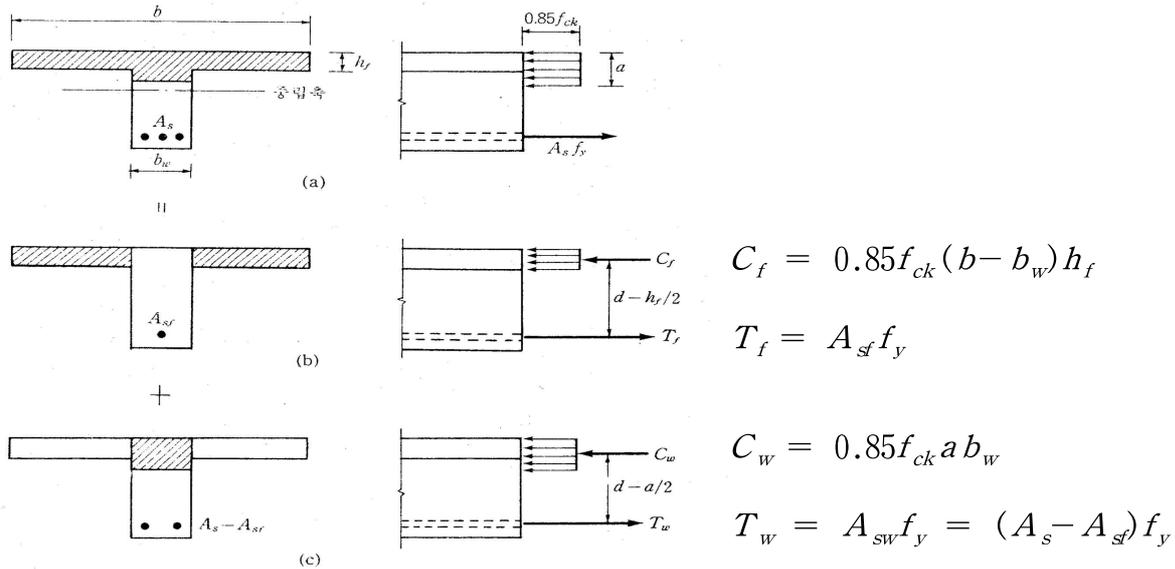


그림 4.15 중립축이 복부에 있는 T형보

[예제 4-5] 그림 4-13과 같은 T형보의 설계강도를 계산하라. 콘크리트와 철근의 재료강도는 각각  $f_{ck} = 21 MPa$ ,  $f_y = 400 MPa$ 로 한다.

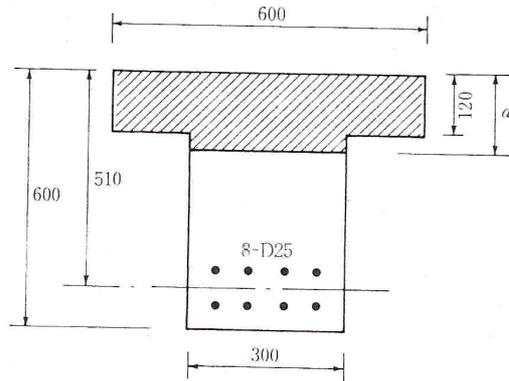


그림 4-15 예제 4-5의 T형보

[풀이] 중립축의 위치를 조사하기 위하여 식 (4.14)로부터

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} = \frac{8 \times 506.7 \times 400}{0.85 \times 21 \times 600} = 151 \text{ mm} > h_f = 120 \text{ mm}$$

중립축은 보의 복부에 위치하므로 T형보 설계법을 적용한다. 식(4.30)과 (4.31)로부터

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{0.85 f_{ck} (b - b_w) h_f}{f_y} \\ &= \frac{0.85 \times 21 \times (600 - 300) \times 120}{400} = 1,607 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{nl} &= A_s f_y \left( d - \frac{h_f}{2} \right) \\ &= 1,607 \times 400 \times \left( 510 - \frac{120}{2} \right) \times 10^{-6} = 289.3 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

식 (4.23)와 (4.33)으로부터

$$a = \frac{(A_s - A_{sf}) f_y}{0.85 f_{ck} b_w} = \frac{(8 \times 506.7 - 1,607) \times 400}{0.85 \times 21 \times 300} = 183 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{n2} &= (A_s - A_{sf}) f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \\ &= (8 \times 506.7 - 1,607) \times 400 \times \left( 510 - \frac{183}{2} \right) \times 10^{-6} \\ &= 409.6 \text{ kNm} \end{aligned}$$

전체 공칭모멘트

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 289.3 + 409.6 = 698.9 \text{ kNm}$$

설계강도

$$\phi M_n = 0.85 \times 698.9 = 594.1 \text{ kNm}$$

## 4.7 보 설계의 일반사항

- 보의 설계 :
  - ① 재료의 강도 결정
  - ② 보의 단면 산정
  - ③ 철근량 산정
  - ④ 배근방법 결정
  
- 설계시 고려되어야 할 점
  - ① 철근의 피복
  - ② 보의 단면형태와 횡지시간격
  - ③ 철근 배근시 고려사항

(1) 철근의 피복 : 철근을 화재로부터 보호하고, 공기와의 접촉에 의하여 부식이 되는 것을 방지하기 위하여 최소피복두께 규정에 따라 보는 40mm 이상 유지되어야 한다. (보의 스테럽의 바깥쪽 표면에서 40mm 이상이 되어야 한다.)

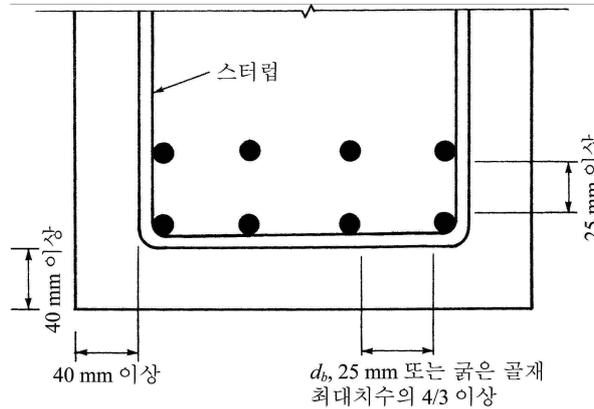


그림 4-16 보의 피복두께 및 철근 간격

0505.4 최소 피복두께

0505.4.1 현장치기 콘크리트

0505.4.1.1 수중에서 타설하는 콘크리트 ..... 100 mm

0505.4.1.2 흙에 접하여 콘크리트를 친 후 영구히 흙에 묻혀 있는 콘크리트 ..... 80 mm

0505.4.1.3 흙에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출되는 콘크리트

(1) D29 이상의 철근 ..... 60 mm

(2) D25 이하의 철근 ..... 50 mm

(3) D16 이하의 철근, 지름 16 mm 이하의 철선 ..... 40 mm

0505.4.1.4 옥외의 공거나 흙에 직접 접하지 않는 콘크리트

(1) 슬래브, 벽체, 장선

① D35 초과하는 철근 ..... 40 mm

② D35 이하인 철근 ..... 20 mm

(2) 보, 기둥 ..... 40 mm

이 경우 콘크리트의 설계기준강도  $f_{ck}$ 가 40MPa 이상인 경우 규정된 값에서 10 mm 저감시킬 수 있다.

(3) 셸, 절판부재 ..... 20 mm

(2) 철근 배근시 고려사항

- a. 소요 단면적이 계산되면 이에 따른 **철근의 크기와 개수**를 정해야 하는데, 지름 이 작은 철근을 사용하면 인장응력을 분산시킬 수 있어 균열방지 등에 유리하나 개수가 많이 소요되기 때문에 간격이 좁아져 배근과 콘크리트 타설에 어려움이 생긴다. 반대로, 지름이 큰 철근을 사용하면 부착면적이 감소하고 응력이 집중되는 단점이 있다.
  
- b. 콘크리트가 밀실하게 채워질 수 있도록 최소한의 철근간격을 두어야 한다. 철근의 배근 간격은 그림 4.16에 표시된 바와 같이, **1단배근**에서 평행한 철근 사이의 순간격은 **철근의 공칭지름  $d_b$ , 25mm 또는 굵은 골재의 최대치수의 4/3이상**으로 하고, **2단 이상**으로 배근되는 경우에는 **단사이의 순간격을 25mm로 하며 상단철근은 하단철근의 바로 위에 배근**하도록 되어 있다.

- c. 콘크리트 인장연단에 가장 가까이에 배치되는 **철근의 중심간격**  $s$ 는 식(4.35)과 식(4.36)에 의해 계산된 값 중에서 **작은 값** 이하로 하여야 한다.  $\Rightarrow$  **균열방지를 위한 간격 제한**

$$s = 375 \left( \frac{x_{cr}}{f_s} \right) - 2.5c_c \quad (4.35)$$

$$s = 300 \left( \frac{x_{cr}}{f_s} \right) \quad (4.36)$$

여기서,  $x_{cr}$ 의 값은 부식의 우려가 없는 일반 옥내나 사무실 내부 정도의 노출 환경에서는 280, 그 외의 환경에 노출된 경우에는 210으로 한다.  $c_c$ 는 인장철근이나 긴장재의 표면과 콘크리트 표면 사이의 최소두께이다. 철근이 하나만 배치된 경우에는 인장연단의 폭을  $s$ 로 한다.  $f_s$ 는 사용하중상태에서 인장연단에서 가장 가까이에 위치한 철근의 응력으로 사용하중 휨모멘트에 대한 해석으로 결정하여야 하지만, 근사값으로  $f_y$ 의 2/3를 사용하여도 좋다.

- c. **T형보** 구조의 플랜지가 인장을 받는 경우에는 휨인장철근을 0503.4.8에서 정의된 유효플랜지폭이나 경간의 1/10의 폭 중에서 작은폭에 걸쳐 분포시켜야 한다. 만일 유효플랜지폭이 경간의 1/10을 넘는 경우에는 약간의 길이 방향 철근을 플랜지 바깥부분에 추가로 배치하여야 한다.
- d. 보나 장선의 깊이  $h$ 가 900 mm를 초과하면 길이 방향 표피철근을 인장연단으로부터  $h/2$ 되는 위치까지 부재 양쪽 측면을 따라 균일하게 배치하여야 한다. 이 때 표피철근의 간격  $s$ 는 식 (4.35)와 식(4.36)중 작은 값에 따라 결정하며, 여기서,  $c_c$ 는 표피철근의 표면에서 부재 측면까지의 최단 거리이다. 변형률 적합조건에 따라 표피철근에 생기는 응력을 계산하는 경우에는 표피철근의 휨인장 저항 성능을 강도계산에 포함시킬 수 있다.

4-7-3 b, d가 주어지고  $\rho$ 가 미지수일 때 단근직사각형보의 설계

예) 고정하중에 의한 모멘트가  $100kN \cdot m$ 이고 활하중에 의한 모멘트가  $80kN \cdot m$ 일 때 단근장방형 보를 설계하라.

$$b = 300mm, d = 440mm, f_{ck} = 21 MPa, f_y = 400 MPa, D19(286.7mm^2)$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi bd^2} = \frac{M_n}{bd^2} = \rho f_y \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_{ck}}\right)$$

(1) 소요 강도  $M_u = 1.2 \times 100 + 1.6 \times 80 = 248kN \cdot m$

(2)  $R_n = \frac{M_u}{\phi bd^2} = \frac{248 \times 10^6}{0.85 \times 300 \times 440^2} = 5.02N/mm^2$

(3)  $\rho = \frac{0.85 f_{ck}}{f_y} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_n}{0.85 f_{ck}}} \right\} = 0.0151$

다만,  $(\rho_{\min} = 0.0035) < \rho \leq (\rho_{\max} = 0.0163)$  를 만족해야 한다.

$$(4) A_s = \rho b d = 0.0151 \times 300 \times 440 = 1,993 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{1993}{286.7} = 6.95$$

$$7D19 = 7 \times 286.7 = 2006.9 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{2006.9}{300 \times 440} = 0.0152 < \rho_{\max} \quad \text{O.K.}$$

$\Rightarrow 6D19 (A_s = 2006.9 \text{ mm}^2)$  2단 배근

(5) 철근 간격 검토

부록 1.  $R_n$  과  $\rho$ 의 관계 유도

$$(1) T = A_s f_y$$

$$C = 0.85 f_{ck} ab$$

$$(2) C = T \text{ 이므로}$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$$

$$(3) M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= A_s f_y \left( d - \frac{A_s f_y}{1.7 f_{ck} b} \right)$$

$$= \frac{A_s}{bd} bd \cdot f_y \left( d - \frac{A_s}{bd} \cdot \frac{f_y d}{1.7 f_{ck}} \right)$$

$$= \rho f_y bd^2 \left( 1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_{ck}} \right)$$

$$(3) M_n = \rho f_y \left( 1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_{ck}} \right) \times b d^2$$

$$(4) \frac{M_n}{b d^2} = \rho f_y \left( 1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_{ck}} \right) = R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2}$$

(5)  $\rho$ 에 대한 2차식으로 전개

$$\Rightarrow \frac{f_y^2}{1.7 f_{ck}} \rho^2 - f_y \rho + R_n = 0$$

$$(6) \rho = \frac{0.85 f_{ck}}{f_y} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_n}{0.85 f_{ck}}} \right\}$$