

北海道大学 正 員 〇横道 英雄
角田 与史雄

1. 序 言

鉄筋コンクリート(RC)のように2種類以上の材料からなる複合材料では、素材の塑性変形を考慮した理論によらなければ一般にその破壊安全度を正確に見積ることができない。曲げモーメントと軸力の組合わせ応力を受けるRC部材の補強には、上縁側鉄筋、下縁側鉄筋、またはその両者による方法があり、その合理的設計は合計鉄筋量が最小になるように選ぶことにより得られる。本文はこの場合のRC断面の極限強度設計方法について述べたものである。なお、以下においては便宜上矩形断面の場合について述べるが、任意の断面形状に対しても応力分布係数 α および β の値が変わるだけで、設計諸式はそのまま使用することができる。

2. 仮 定

RC部材の極限強度理論は古くから多くの研究があり、材料の変形特性および断面の破壊条件に関する仮定、提案には多少の差異があるが、ここでは次の仮定に基づくものとする。すなわち、鉄筋の応力-ひずみ曲線は図-1に示すように完全弾塑性体と仮定し、降伏後のひずみ硬化による附加抵抗は無視し、かつ、ひずみ限界は設けない。コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線および極限ひずみ ϵ_c^* の値が与えられていると仮定する(図-2)。従って断面の破壊は、上、下両縁が引張ひずみを受ける場合を除き、コンクリートの圧縮縁ひずみが ϵ_c^* に達したときに生ずる。断面内のひずみは直線分布であるとし、鉄筋はその位置のコンクリートと同じひずみを受けると仮定する。コンクリートの引張抵抗は常に無視する。軸力は圧縮を正とし、曲げモーメントは下縁に引張応力を与える場合と正とする。なお、以下においては、負の曲げモーメントを受けるときには断面の上、下を入れ換えて考えればよいので、正の曲げモーメントの場合のみを考える。

3. 鉄筋配置と極限強度特性

図-3は下縁側にのみ鉄筋を有する単鉄筋断面の M/N 破壊限界線の典型的形状と表わす。領域Iは無筋コンクリートとしても計算上は抵抗できる範囲である。領域IIIは断面破壊時に鉄筋が降伏している範囲で、鉄筋比の増加とともに破壊強度が増加し、鉄筋の強度が有効に利用される。それに対して領域IIおよびIVでは断面の破壊強度が鉄筋に直接関係し

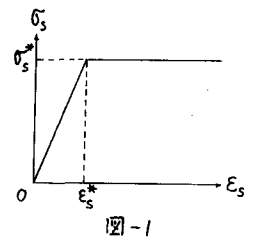


図-1

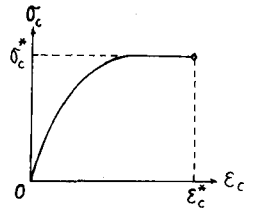


図-2

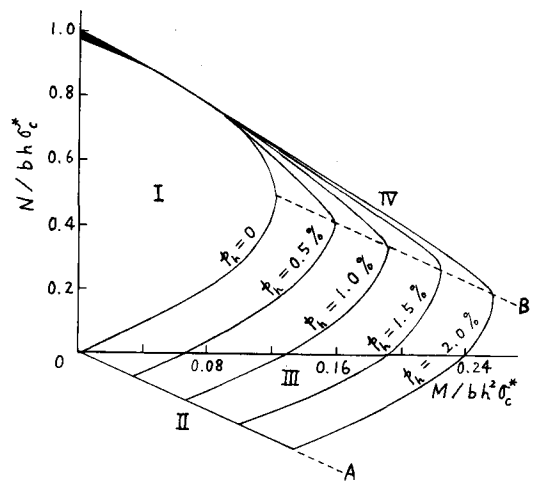


図-3

ないコンクリート上縁の引張または圧縮抵抗によって支配されるため、鉄筋の補強効果が非常に小さくなっている。図-4は上縁側のみに鉄筋を有する単鉄筋断面の破壊限界線を表す。ここに領域Ⅴは断面破壊時に鉄筋が圧縮応力により降伏しており、鉄筋の強度が有効に働いている。しかし、領域ⅣおよびⅥでは断面の破壊が下縁側コンクリートの引張または圧縮抵抗によって支配されるため、鉄筋の強度が十分に生かされていない。

結局、単鉄筋断面として有効に補強される M/N 領域はⅢ（下縁側引張鉄筋）およびⅤ（上縁側圧縮鉄筋）の場合だけであり、その他の領域では複鉄筋断面にしなければ経済的設計は得られない。すなわ

ち領域Ⅱの場合には上、下両縁側に引張鉄筋、領域Ⅳでは上縁側圧縮鉄筋、下縁側引張鉄筋、および領域Ⅵでは上、下両縁側に圧縮鉄筋を挿入する複鉄筋断面となる。図-5はこのように設計される場合の鉄筋量と断面破壊強度の関係の一例を示したものである。実際の設計においてはこのような図表を各種の材料強度、断面形状に対してあらかじめ作製しておけば便利であり、容易に経済的設計を得ることができる。

4. 各種 M/N 領域の境界

図-5において領域ⅡとⅢとの境界線Aは両縁側に引張鉄筋が必要となる限界の状態であって、下縁側鉄筋の周りのモーメント $M_s=0$ の場合に相当する。

領域ⅢとⅣとの間の境界線Bは、下縁側単鉄筋断面において鉄筋の降伏と同時に上縁のコンクリートひずみが ϵ_c^* に達するような応力状態（

図-6）に相当し、 M_s の値は以下のとき

$$M_s^* = \alpha R^* b d^2 (1 - \beta R^*) \sigma_c^* = \bar{p}^* d (1 - \beta R^*) \sigma_s^* \quad (1)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} R^* &= \epsilon_c^* / (\epsilon_c^* + \epsilon_s^*), \quad \bar{p}^* = p^* - N / b d \sigma_s^* \\ p^* &= \alpha R^* / m^*, \quad m^* = \sigma_s^* / \sigma_c^* \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

α および β は圧縮部コンクリートの応力分布に関する

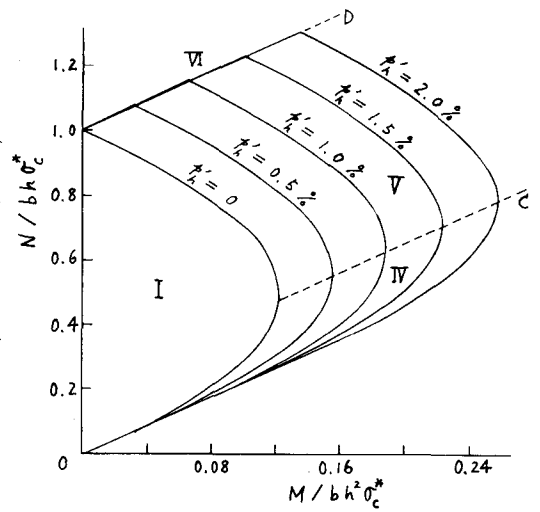


図-4

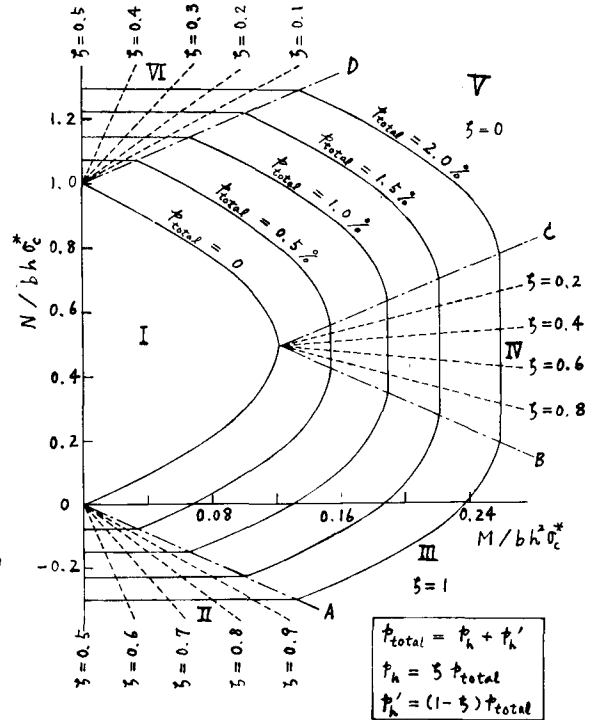


図-5

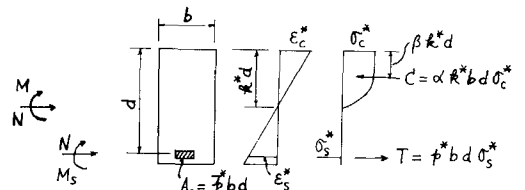


図-6

る係数で、藤田によれば $\alpha = 0.8$, $\beta = 0.412$ の値をとる。また、 $\bar{p}^*$ および $\bar{p}^*$ はそれぞれ単純曲げおよび軸力を伴う曲げに対する平衡鉄筋比を表し、図表を用いて設計する場合には領域Ⅲ ($\bar{p} \leq \bar{p}^*$, 単鉄筋) と領域Ⅳ (複鉄筋) の区別の判定に利用することもできる。

領域ⅣとⅠの境界線Cは、複鉄筋断面において計算上引張鉄筋が必要なくなる限界に相当する。このときの上縁側鉄筋の周りのモーメント M'_s は、図-7に示す応力状態より次の値をとる；

$$M'_{s1} = -\alpha R^* b d^2 (\beta R^* - \alpha') \sigma_c^* \quad (3)$$

領域ⅤとⅠの間の境界線Dは上、下両縁側に圧縮鉄筋による補強が必要となる限界である。このときの上縁側鉄筋の周りのモーメントは次の値になる(図-8)；

$$M'_{s2} = -b h^2 (0.5 - \alpha'_h) \sigma_c^* \quad (4)$$

5. 断面設計方法

(1) M/N が図-5のⅠの範囲にあるときには計算上鉄筋は必要ないが、最小量の用心鉄筋を挿入する必要がある。とくに引張ひずみが生ずる場合にはそれに相応する鉄筋量は少くとも必要である。

(2) $M_s < 0$ の場合(領域Ⅱ)には上、下両縁側に引張鉄筋を配置する。各鉄筋の必要断面積は図-9を参照して次のように求められる；

$$\left. \begin{aligned} A_s &= (-N) e' / (e + e') \sigma_s^* \\ A'_s &= (-N) e / (e + e') \sigma_s^* \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

または

$$\left. \begin{aligned} A'_s &= (-M_s) / (e + e') \sigma_s^* \\ A_s &= (-N) / \sigma_s^* - A'_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(3) $0 \leq M_s \leq M_s^*$ の場合(領域Ⅲ)には引張単鉄筋として設計する。このときの応力状態は図-10に示す通りであり、必要鉄筋量は次式より得られる

$$\left. \begin{aligned} A_s &= \bar{p} b d, \quad \bar{p} = \bar{p} - N / b d \sigma_s^* \\ \bar{p} &= \frac{\alpha}{2\beta m^*} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4\beta}{\alpha} \frac{M_s}{b d^2 \sigma_c^*}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

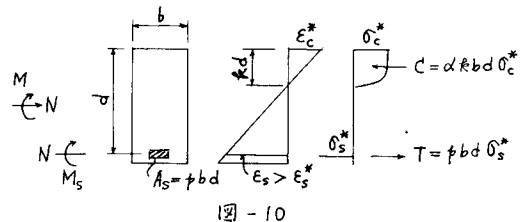
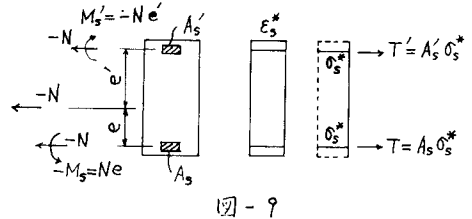
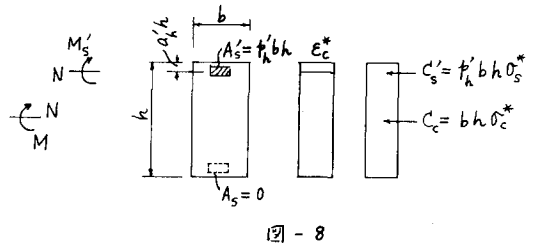
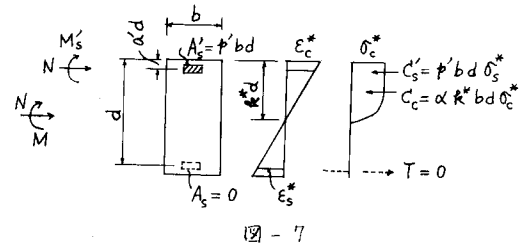
なお、上述の $M_s \leq M_s^*$ の条件は $d \geq d^*$ の条件に置換えることができる。ここに d^* は単鉄筋断面として設計しようとするときの必要最小有効高さであり、図-6より次式によって与えられる；

$$d^* = \sqrt[3]{M_s / b \sigma_s^*} = \sqrt[3]{M_s / b \sigma_c^*} \quad (8)$$

ここには

$$\left. \begin{aligned} \gamma_s^* &= \sqrt{m^* / \alpha R^* (1 - \beta R^*)} \\ \gamma_c^* &= \sqrt{1 / \alpha R^* (1 - \beta R^*)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(4) $M_s > M_s^*$ か $M'_s > M'_{s1}$ の場合(領域Ⅳ)には複鉄筋として設計する。このときの必要鉄筋量は図-11を参照して次のように求められる；



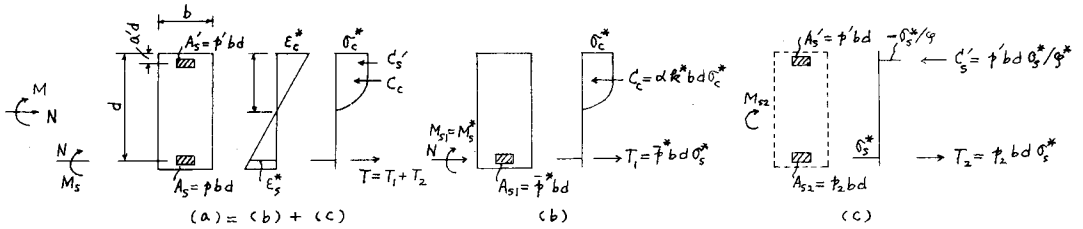


図 - 11

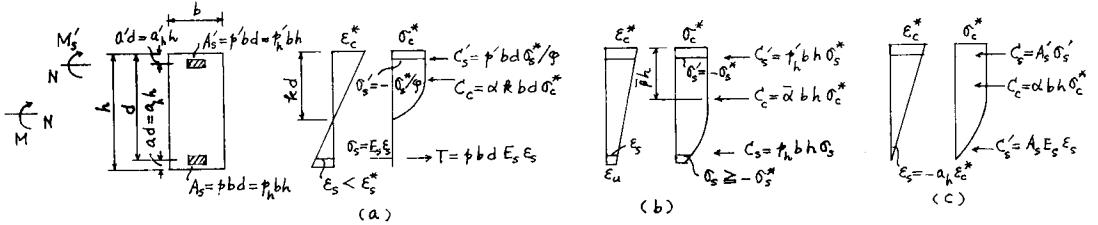
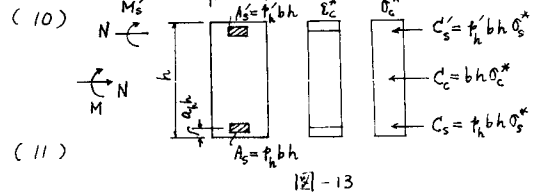


図 - 12

$$\left. \begin{aligned} A_s &= p b d, \quad p = \bar{p}^* - p_2 \\ A_s' &= p' b d, \quad p' = q p_2 \end{aligned} \right\}$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} p_2 &= M_{s2} / b d^2 \sigma_s^* (1 - a'), \quad M_{s2} = M_s - M_{s1} \\ M_{s1} &= \bar{p}^* b d^2 \sigma_s^* (1 - \beta k^*), \quad q = (1 - k^*) / (k^* - a') \geq 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$



q は圧縮鉄筋が断面破壊時に降伏点に達していない場合を考慮する係数であり、圧縮鉄筋の強度と有効に利用するためにはできるだけ $q = 1$ すなわち圧縮鉄筋位置を次のように選ぶのがよい；

$$a' \leq k^* (1 - \epsilon_s^* / \epsilon_c^*) \quad (12)$$

(5) $M_{s2}^* \leq M_s' \leq M_{s1}^*$ の場合 (領域Ⅶ) には圧縮単鉄筋となるが、下縁側にも最小量の鉄筋を入れる必要がある。このときの応力状態には図-12のaとbの2つの場合があり、その境界は図-12cより

$$M_{s3}^* = -\alpha b h^2 (1 - \beta) \sigma_c^* - A_s E_s \epsilon_c^* a_h (1 - a_h) h \quad (13)$$

である。 $M_{s3}^* \leq M_s' \leq M_{s1}^*$ の場合の必要鉄筋量は (下縁側鉄筋量は既知量とする)

$$\left. \begin{aligned} A_s' &= p' b d, \quad p' = q (N / b d \sigma_s^* - \alpha k^* / m^* + p E_s \epsilon_c^* (1 - k^*) / \sigma_s^* k^*) \\ q &= k^* / (k^* - a') \cdot \epsilon_s^* / \epsilon_c^*, \quad \alpha \beta k^3 - \alpha \alpha' k^2 + (M_s' / b d^2 \sigma_c^* + p E_s \epsilon_c^* / \sigma_c^*) k = p E_s \epsilon_c^* (1 - a') / \sigma_c^* \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$M_{s2}^* \leq M_s' \leq M_{s3}^*$ の場合には

$$\left. \begin{aligned} A_s' &= p_h' b h, \quad p_h' = N / b h \sigma_s^* - \alpha / m^* - p_h \sigma_s / \sigma_s^*, \quad \sigma_s = E_s \epsilon_s^* (a_h + \gamma - \gamma a_h) \leq \sigma_s^* \\ \alpha (\beta - a_h') + p_h (1 - a_h) \sigma_s / \sigma_s^* + M_s' / b h^2 \sigma_c^* &= 0, \quad \gamma = \epsilon_u / \epsilon_c^* \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここに α および β は与えられたコンクリートの応力-ひずみ曲線より γ とともに試算的に定めなければならない。なお、(14) および (15) 式において近似的に下縁側鉄筋の影響を無視し、 $p = 0$ として設計しても誤差はわずかである。

(6) $M_s' \leq M_{s2}^*$ の場合 (領域Ⅷ) は両縁側に圧縮鉄筋を必要とする。このときの必要鉄筋量は図-13より次式によって与えられる；

$$\left. \begin{aligned} A_s &= p_h b h, \quad p_h = -M_s' / b h^2 \sigma_s^* (1 - 2a) - 1 / 2 m^* \\ A_s' &= p_h' b h, \quad p_h' = N / b h \sigma_s^* - 1 / m^* - p_h \end{aligned} \right\} \quad (16)$$