

論文 多段配筋 RC 部材の拡張許容曲げモーメント算定式の提案

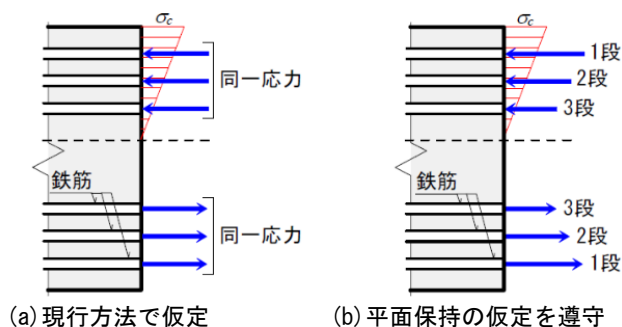
柳町 涼太^{*1}・野村 圭介^{*2}

要旨：現在の多段配筋 RC 梁の許容曲げモーメント算定式では、各段の鉄筋の応力は同じと考えられている（現行方法）。しかし、平面保持の仮定が成り立つとすれば、中立軸から離れた鉄筋ほど応力が大きくなると考えられ、現行方法が 2 段目以降の鉄筋応力を過大に評価していることになる。本論文では、多段配筋を考慮した許容曲げモーメント算定式を提案し、現行方法との許容曲げモーメントの差異を調査した。2 つの式の差異は応力中心距離と鉄筋重心位置の影響が大きいことが明らかになった。影響の大きい要因を用いて多段配筋を考慮した許容曲げモーメントを簡易に算出できる近似式を提案した。

キーワード：鉄筋コンクリート、多段配筋、許容曲げモーメント、算定式

1. はじめに

現在、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾では、多段配筋を有する RC 部材の許容曲げモーメントを求める方法（以下、現行方法）が示されている。その方法では、部材断面の有効せいを圧縮縁から引張鉄筋の重心位置までの距離としており、応力中心距離や鉄筋の応力度はこの距離で求められている。このことから、現行方法による鉄筋応力度は、図-1(a)に示すように、鉄筋群内で同一と仮定していることになる。一方で、規準では「許容曲げモーメントは引張鉄筋が鉄筋の許容応力度 f_t に達した時に対して求まる値」とされている。平面保持の仮定が成り立つとすれば、図-1(a)の応力分布は、図-1(b)のように、中立軸から離れた鉄筋ほど応力が大きくなるため、1 段目鉄筋が f_t を超えることになり、現行方法は規準の考え方を遵守していないといえる。さらに、外側鉄筋の応力が内側に比べて大きくなることで、鉄筋の応力中心は重心位置よりも外側に表れると考えられる。規準では、これらが許容曲げモーメントに及ぼす影響について言及されておらず、適切な許容曲げモーメントを得るには、多段配筋の影響を明確にする必要がある。



多段配筋 RC 部材に関する研究として趙らと島津らの

研究がある。趙らは、RC 梁の曲げ試験を行い、多段配筋がひび割れ性状に与える影響について報告している²⁾。島津らは、鉄筋量を同一とした多段配筋と普通配筋の RC 部材で曲げ試験を行い、終局曲げ強度の差異を調査し、従来の理論を拡張した終局曲げ強度の算定式を提案している³⁾。これらの研究では、平面保持の仮定が許容曲げモーメントに及ぼす影響については論及されていない。

本論文では、平面保持の仮定による影響を考慮した多段配筋 RC 部材の許容曲げモーメント算定式を求めることを目的とする。先に述べた外側鉄筋応力の増大および応力中心距離の伸長を考慮した許容曲げモーメントを求める方法（以下、精算方法）を提案し、さらに、現行方法との差異について述べている。なお、精算方法は現行方法に比べて許容曲げモーメント算定までの過程が複雑であった。そのため、より簡便に精算方法による許容曲げモーメントの近似値を求める方法についても検討している。この近似値を求める方法では、現行方法は既に周知されていることから、現行方法の算定式を基準としている。その算定式に精算方法と現行方法の差異の要因を考慮した式を乗じて、近似値を求める方法として提案している。なお、この近似値を求める方法は、以降は拡張現行方法と呼ぶ。拡張現行方法は、精算方法で得られる許容曲げモーメントより安全側の値が得られるように提案しており、その差異の精度についても述べている。なお、本論文で提案する精算方法および拡張現行方法は曲げモーメントのみを受ける RC 部材に適用されることを想定している。

また、RC 部材の断面内に軸方向力が働くと許容曲げモーメントは大きく変化する。本論文では、軸方向力を受ける場合についても、平面保持の仮定による影響を考慮した許容曲げモーメント算定方法についても検討して

*1 東海大学 工学研究科建築土木工学専攻（学生会員）

*2 東海大学 工学部建築学科助教 博士（工学）

おり,こちらでも現行方法との差異について述べている。

本論文の構成を述べる。2 章では現行方法と精算方法の許容曲げモーメント算定式を示す。3 章では,様々な断面形状に対して現行方法と精算方法による許容曲げモーメントを求め,その差異の要因について考察する。4 章では拡張現行方法を提案し,その方法の精度について述べる。5 章では軸方向力を受ける場合における精算方法の定式化と現行方法との差異および差異の要因について述べる。6 章では本論文で得られた知見を述べる。

2. 現行方法・精算方法による許容曲げモーメント算定式

2.1 現行方法の概要

本論文では精算方法と比較するため,変数の名称や算定式の構成を RC 規準から変えて表現している。現行方法に用いる変数を図-2 に示す。 b は部材の幅, D は部材のせい, x_n は圧縮縁から中立軸位置までの距離を表している。 d_c, d_t は圧縮縁から鉄筋の重心位置までの距離, a_c, a_t は鉄筋の一本あたりの断面積, m_c, m_t は鉄筋本数を表している。 c は圧縮, t は引張の属性であることを表している。

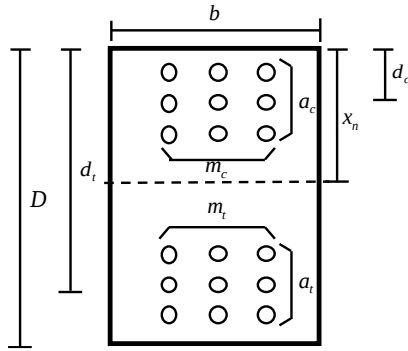


図-2 現行方法の変数

現行方法による許容曲げモーメント cM_a を式(1)に示す。なお, f_t は引張鉄筋の引張許容応力度, f_c はコンクリートの圧縮許容応力度, n はヤング係数比である。

$$\begin{aligned} cM_a &= \min(cM_t, cM_c) \\ cM_t &= c j f_t a_t m_t \\ cM_c &= c j f_c \left\{ \frac{b x_n^3}{2} + (n-1) \frac{(x_n - d_c) a_c m_c}{x_n} \right\} \\ c j &= d_t - \frac{b x_n^3 + 6(n-1)(x_n - d_c) a_c m_c d_c}{3 \{ b x_n^2 + 2(n-1)(x_n - d_c) a_c m_c \}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中の cM_t は引張鉄筋が f_t に達した場合, cM_c はコンクリートの圧縮縁が f_c に達した場合の許容曲げモーメントであり, cM_a はそれらの小さい方の値である。 cM_t と cM_c は引張あるいは圧縮合力に応力中心距離 j を乗じた構成である。なお, 式中の x_n は断面内の力の釣合い式である式(2)を解いて求める。

$$\begin{aligned} b x_n^2 + 2 \{ (n-1) A_c + n A_t \} x_n - 2 \{ (n-1) S_c + n S_t \} &= 0 \quad (2) \\ A_c &= a_c m_c, A_t = a_t m_t, S_c = d_c a_c m_c, S_t = d_t a_t m_t \end{aligned}$$

2.2 精算方法の概要

精算方法では, 図-1 (b) に示したように, 各段の鉄筋の応力が中立軸からの距離に応じて変わるものとする。これにより, 現行方法では引張側あるいは圧縮側で一律に扱われている鉄筋本数, 断面積, 圧縮縁からの距離を各段で個別に扱う必要がある。各段を i 段目と表現し, i 段目に配置された鉄筋の本数を m_{ci}, m_{ti} , 1 本あたりの断面積を a_{ci}, a_{ti} , 圧縮縁からの距離を d_{ci}, d_{ti} とした (図-3)。なお, i は引張縁あるいは圧縮縁側を 1 としている。

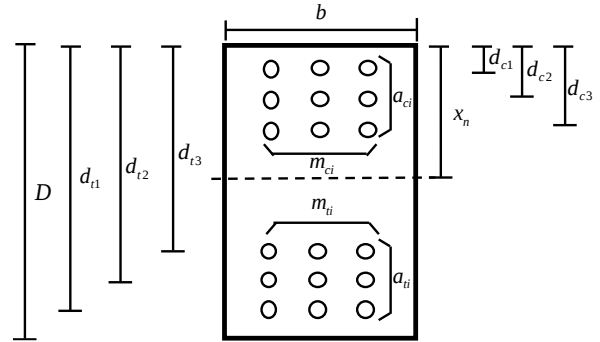


図-3 精算方法の変数

精算方法による許容曲げモーメント sM_a を式(3)に示す。精算方法でも, sM_a は sM_t (引張鉄筋が f_t に達する) と sM_c (圧縮縁コンクリートが f_c に達する) の小さい方としており, これらは合力に応力中心距離 j を乗じて求めている。

$$\begin{aligned} sM_a &= \min(sM_t, sM_c) \\ sM_t &= s j f_t \sum \frac{(d_{ti} - x_n) a_{ti} m_{ti}}{(d_{ti} - x_n)} \\ sM_c &= s j f_c \left\{ \frac{b x_n^3}{2} + (n-1) \frac{\sum (x_n - d_{ci}) a_{ci} m_{ci}}{x_n} \right\} \\ s j &= \frac{\sum (d_{ti} - x_n) a_{ti} m_{ti} d_{ti}}{\sum (d_{ti} - x_n) a_{ti} m_{ti}} - \frac{b x_n^3 + 6(n-1) \sum (x_n - d_{ci}) a_{ci} m_{ci} d_{ci}}{3 \{ b x_n^2 + 2(n-1) \sum (x_n - d_{ci}) a_{ci} m_{ci} \}} \end{aligned} \quad (3)$$

sM_t における合力は, 1 段目の引張鉄筋の応力度を f_t , 2, 3 段目では中立軸からの距離比に応じて低減させた f_t として求めている。 sM_c における圧縮鉄筋の合力についても, 中立軸から各段鉄筋までの距離比に応じた応力度で求めている。応力中心距離 j は各段鉄筋の合力によって重み付けした距離比から求めている。なお, 特定の曲げモーメントにおける引張・圧縮合力は精算方法と現行方法で変わらないため, x_n は一致する。

3. 現行方法と精算方法の差異

3.1 概要

複数のモデルについて, 現行方法と精算方法で求めた許容曲げモーメントの差異を調査した。

モデルは, 幅 350mm, せい 300~2000mm を 850mm 間隔, 鉄筋段数を圧縮, 引張でそれぞれ 1~3 段, 鉄筋本数

を各段で 0~3 本、鉄筋径を D16,19,22,25,29 (全て SD345), 鉄筋間距離を鉄筋径の 1.5,2.0,2.5 倍, かぶり厚を 50mm, コンクリートを $F_c=24(n=15)$ とし, 引張鉄筋比が 0.4% 以上かつ, 複筋比 0.4 以上, 内側鉄筋本数が外側鉄筋本数を超えない条件を満たす 63819 種類を対象とした。また, 許容応力度には長期許容応力度を用いた。

3.2 現行方法の安全率 cR_s

本論文では, 現行方法に対する精算方法の許容曲げモーメントの比率を安全率 cR_s として表す。 cR_s が 1 未満であれば, 現行方法の許容曲げモーメントが精算方法に比べて過大であり, 危険側と判断できる。

図-4 に全モデルに対して求めた cR_s の累積頻度分布を示す。横軸は cR_s , 縦軸は%表記した累積頻度である。95%程度のモデルが危険側であった。 cR_s の最小値は 0.881 であり, 現行方法の許容曲げモーメントが最大で 13.5% 過大に評価していることになる。また, 安全側 ($cR_s > 1$) であったのは, 引張鉄筋が 1 段配筋かつ複筋比が大きい場合であった。

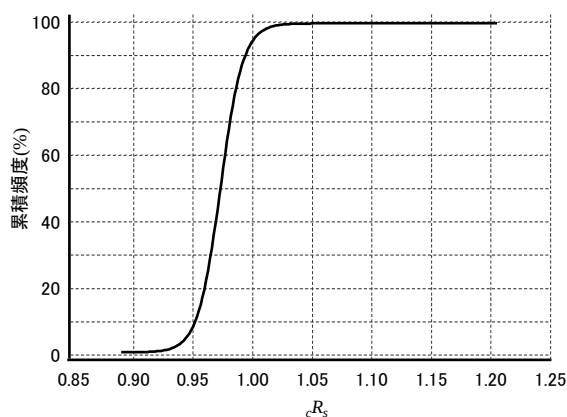


図-4 cR_s の累積頻度分布

拡張現行方法を提案するため, cR_s に影響する変数を調査する。

許容曲げモーメントを求める際, 許容応力度に達する鉄筋応力の位置は, 現行方法では引張鉄筋重心位置 d_t , 精算方法では 1 段目引張鉄筋位置 d_n である。これにより, 現行方法に比べて精算方法の方が, 鉄筋が許容応力度に達するのを早めており, 許容曲げモーメントに差異が表れている。このことから, d_t と d_n で cR_s の傾向が表せられるのではないかと考えた。 cR_s は現行方法に対する精算方法の比であるため, これと同じ構成で, d_t (現行方法用) に対する d_n (精算方法用) の比を変数と仮定した。 d_n/d_t で cR_s をまとめると図-5 となる。縦軸は cR_s , 横軸は d_n/d_t である。赤色の点線は後述する。

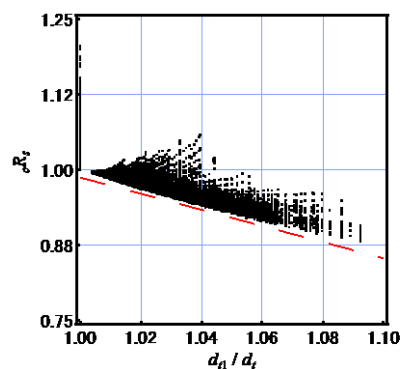


図-5 cR_s と d_n/d_t の関係

概ねに d_n/d_t に従って cR_s が下がる傾向にあるが, 同一の d_n/d_t の時に cR_s が広く分布していることがわかる。これは, 圧縮鉄筋の影響が考慮されていないことに起因している。圧縮鉄筋が多段の場合, 現行方法では圧縮鉄筋の合力位置を圧縮鉄筋重心位置としているが, 精算方法では, 外側鉄筋応力の増大を考え, 合力位置は圧縮鉄筋重心位置よりも外側となる。これにより, 精算方法では, 現行方法に比べて応力中心距離が伸び, 許容曲げモーメントが増大する。 d_n/d_t だけではこの影響を考慮できず, 許容曲げモーメントの差異を正確に表すことができない。

これを踏まえ, 多段の圧縮鉄筋による影響を考慮するため, 変数に応力中心距離を加えることとした。多段に考えることで, 前述のように, 精算方法では, 現行方法に比べて応力中心距離が長く, 許容曲げモーメントも大きくなる。このことから, 現行方法の応力中心距離 j に対する精算方法の応力中心距離 j の比 j/j に従って cR_s は大きくなると予想できる。一方で, 図-5 で用いていた d_n/d_t が増加すると cR_s は小さくなる。 j/j と d_n/d_t の影響が逆なので, d_n/d_t に j/j の逆数を乗じた $j d_n / j d_t$ を変数と仮定した。 $j d_n / j d_t$ でまとめた cR_s を図-6 に示す。縦軸は cR_s , 横軸は $j d_n / j d_t$ である。 cR_s は $j d_n / j d_t$ の増加に伴い減少しており, 相関係数は 0.953 でよい相関が見られた。

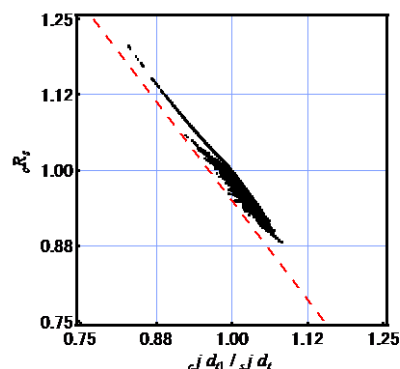


図-6 cR_s と $j d_n / j d_t$ の関係

4 現行方法の拡張

4.1 概要

仮定した変数を基に、精算方法の近似値を求めることのできる拡張現行方法を提案する。この方法では、現行方法の算定式に安全率 cR_s の近似式を乗じて算定式を求めている。本論文では、 cR_s の傾向をよく表現できていた $j d_n / j d_t$ を変数に用いた手法 1 と、より簡便に計算できる d_n / d_t を変数に用いた手法 2 を提案した。なお、精算方法による許容曲げモーメントを超えないように拡張現行方法を提案している。

4.2 定式化

4.2.1 手法 1

手法 1 の算定式を式(4)に示す。括弧内の式が前章で求めた cR_s を $j d_n / j d_t$ で線形近似した式であり、図-6 中では点線で表している。この式は最小二乗法で求めており、回帰係数は有効数字 3 桁としている。

$${}_s M_a^1 = {}_c M_a \left(-1.31 \frac{j d_n}{j d_t} + 2.26 \right) \quad (4)$$

4.2.2 手法 2

手法 2 の算定式を式(5)に示す。括弧内の式が前章で求めた cR_s を d_n / d_t で線形近似した式であり、図-5 中では点線で表している。この式は最小二乗法で求めており、回帰係数は有効数字 3 桁としている。

$${}_s M_a^2 = {}_c M_a \left(-1.33 \frac{d_n}{d_t} + 2.32 \right) \quad (5)$$

4.3 拡張現行方法の精度

拡張現行方法の精度を調査する。手法 1 と精算方法の安全率を $e_1 R_s$ 、手法 2 の場合を $e_2 R_s$ と呼ぶ。図-7 に $e_1 R_s$ と $e_2 R_s$ の累積頻度分布を、比較のための cR_s と併せて示す。横軸は安全率、縦軸は%表記した累積頻度である。なお、 $e_2 R_s$ については、図-5 からわかるように $d_n / d_t = 1$ の場合に cR_s の傾向が見られなかったため、 $d_n / d_t = 1$ と $d_n / d_t > 1$ の場合に分けて示している。

$e_1 R_s$ の最大誤差は 4.9%であった。 $e_2 R_s$ の最大誤差は、 $d_n / d_t > 1$ では 4.7%、 $d_n / d_t = 1$ では 29.9%であった。

手法 1 は、各段鉄筋の合力によって重み付けした距離比から求めた応力中心距離の計算を必要とするが、近似値を精度の良く求めることができる。手法 2 は、現行方法に用いる変数のみで近似値を求めることができるが、引張鉄筋が 1 段配筋で圧縮鉄筋が多段配筋の場合には差異が大きくなる。

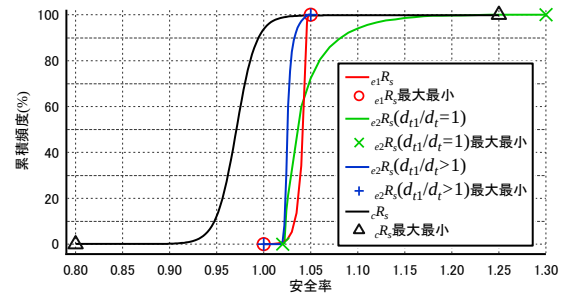


図-7 安全率の累積頻度分布

5. 軸方向力を考慮した精算方法

5.1 概要

前章までは、軸方向力を考えない純曲げの部材を扱った。本章では、曲げと軸方向力を受ける RC 部材について、平面保持の仮定を基にした精算方法を提案する。RC 部材が曲げと軸方向力を受ける場合、軸方向力の大きさによって許容曲げモーメントが変化する。軸方向力 N と許容曲げモーメント M_a の関係性は図-8 のように表され、断面内の応力分布および許容応力度に達した位置で区別すると 4 つの領域に分けることができる。

本論文では、断面内の応力が全て圧縮で、圧縮縁コンクリートが許容応力度に達する場合をゾーン A、中立軸が断面内にあり、圧縮縁コンクリートが許容応力度に達する場合をゾーン B-1、中立軸が断面内にあり、鉄筋が許容応力度に達する場合をゾーン B-2、断面内の応力が全て引張で、鉄筋が許容応力度に達する場合をゾーン C と呼ぶ。許容曲げモーメントは、属する領域を中立軸の位置で判断し、その領域に該当する算定式で求める。

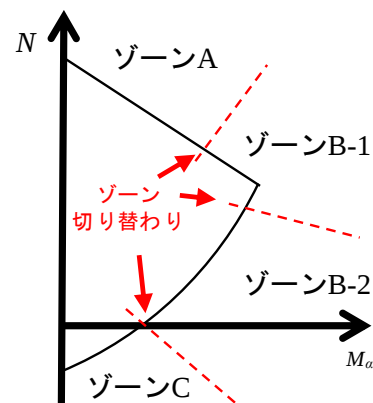


図-8 N - M_a 相関曲線

5.2 定式化

5.2.1 現行方法の概要

現行方法について述べる。なお、使用する変数は 2 章 1 節と同様である。領域の判定式を式(6)に示す。釣合い中立軸位置 x_n は、鉄筋と圧縮縁コンクリートが同時にそれぞれの許容応力度に達する時の中立軸位置である。

$$\begin{aligned}
{}_c x_n^A \geq d_t & \rightarrow \text{ゾーンA} \\
{}_c x_n \leq {}_c x_n^{B1} < d_t & \rightarrow \text{ゾーンB-1} \\
0 \leq {}_c x_n^{B2} < {}_c x_n & \rightarrow \text{ゾーンB-2} \\
{}_c x_n^A \text{ and } {}_c x_n^{B1} \text{ and } {}_c x_n^{B2} < 0 & \rightarrow \text{ゾーンC} \\
{}_c x_n &= \frac{d_t}{(f_t / nf_c + 1)}
\end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中の A,B1,B2,C の添字を付した ${}_c x_n$ は、各領域を仮定した合力の釣合いから求めた中立軸位置であり、式(7.1)～(7.4)で求められる。

$${}_c x_n^A = \frac{-bD^2 / 2 - (n-1)(S_c + S_t)}{N / f_c - bD - (n-1)(A_c + A_t)} \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned}
{}_c x_n^{B1} &= \frac{1}{b} \left[-\{(n-1)A_c + nA_t - N / f_t\} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\{(n-1)A_c + nA_t - N / f_t\}^2 + 2b\{(n-1)S_c + nA_t\}} \right] \quad (7.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}_c x_n^{B2} &= \frac{1}{b} \left[-\{(n-1)A_c + nN / f_t\} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\{(n-1)A_c + nN / f_t\}^2 + 2b\{(n-1)S_c + A_t + nN / f_t\}} \right] \quad (7.3)
\end{aligned}$$

$${}_c x_n^C = \frac{(d_c - D)A_c + (d_t - D)A_t - (d_t - D)N / f_t}{(N / f_t - A_c - A_t)} \quad (7.4)$$

ここに、 N は軸方向力である。

領域判定後に真の中立軸位置 ${}_c x_n$ が決まる。 ${}_c x_n$ は、ゾーン A では式(7.1)、ゾーン B-1 では式(7.2)、ゾーン B-2 では式(7.3)、ゾーン C では式(7.4)となる。

各領域における許容曲げモーメント算定式を式(8.1)～(8.4)に示す。なお、上付き添字が領域を表している。

$$\begin{aligned}
{}_c M_a^A &= f_c \left\{ \frac{({}_c x_n)^2 b}{3} - \frac{({}_c x_n - D)^3}{{}_c x_n} b \right. \\
&\quad \left. + (n-1) \frac{({}_c x_n - d_c)^2}{{}_c x_n} a_c m_c + (n-1) \frac{({}_c x_n - d_t)^2}{{}_c x_n} a_t m_t \right\} \quad (8.1) \\
&\quad + N(D/2 - {}_c x_n)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}_c M_a^{B1} &= f_c \left\{ \frac{b({}_c x_n)^2}{3} + (n-1) \frac{({}_c x_n - d_c)^2}{{}_c x_n} a_c m_c \right. \\
&\quad \left. - n \frac{(d_t - {}_c x_n)^2}{{}_c x_n} a_t m_t \right\} + N(D/2 - {}_c x_n) \quad (8.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}_c M_a^{B2} &= f_t \left\{ \frac{b{}_c x_n^2}{3n(d_t - {}_c x_n)} {}_c x_n + \frac{(n-1)({}_c x_n - d_c)^2}{n(d_t - {}_c x_n)} A_c \right. \\
&\quad \left. - \frac{(n-1)(d_t - {}_c x_n)}{n} A_t \right\} + N(D/2 - {}_c x_n) \quad (8.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}_c M_a^C &= f_t \left\{ \frac{({}_c x_n + d_c - D)^2}{{}_c x_n + d_t - D} A_c + \frac{({}_c x_n + d_c - D)^2}{{}_c x_n + d_t - D} A_t \right\} \\
&\quad + N({}_c x_n - D/2) \quad (8.4)
\end{aligned}$$

5.2.2 精算方法の概要

精算方法では、各段の鉄筋応力が中立軸からの距離に応じて変わるものと考え、鉄筋本数、断面積、圧縮縁からの距離を各段で個別に扱う。なお鉄筋の段については、式の簡略化の為に、圧縮縁側の段から順に 1～4 段と呼んでいる。 i 段目に配置された鉄筋の本数を m_i 、 i 段目鉄筋の 1 本あたりの断面積を a_i 、圧縮縁から i 段目鉄筋までの距離を d_i とした (図-9)。

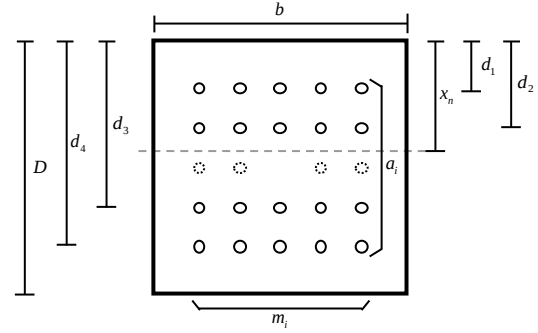


図-9 精算方法の変数

領域の判定式を式(9)に示す。釣合い中立軸位置 ${}_s x_n$ は圧縮縁コンクリートと引張鉄筋が同時に許容応力度に達する時の中立軸位置である。精算方法の場合、引張側 1 段目の鉄筋がその他の段より先に許容応力度に達するため、 ${}_s x_n$ の算定式では、現行方法とは異なり、圧縮縁から引張側 1 段目鉄筋までの距離 d_{t1} を用いている。

$$\begin{aligned}
{}_s x_n^A \geq d_{t1} & \rightarrow \text{ゾーンA} \\
{}_s x_n \leq {}_s x_n^{B1} < d_{t1} & \rightarrow \text{ゾーンB-1} \\
0 \leq {}_s x_n^{B2} < {}_s x_n & \rightarrow \text{ゾーンB-2} \\
{}_s x_n^A \text{ and } {}_s x_n^{B1} \text{ and } {}_s x_n^{B2} < 0 & \rightarrow \text{ゾーンC} \\
{}_s x_n &= \frac{d_{t1}}{(f_t / nf_c + 1)}
\end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中の A,B1,B2,C の添え字を付した ${}_s x_n$ は、各領域を仮定した合力の釣合いから求めた中立軸位置であり、式(10.1)～(10.4)となる。

$${}_s x_n^A = \frac{-bD^2 / 2 - (n-1) \sum d_i a_i m_i}{N / f_c - bD - (n-1) \sum a_i m_i} \quad (10.1)$$

$$\begin{aligned}
{}_s x_n^{B1} &= \frac{1}{b} \left\{ -\left(\sum k_i a_i m_i - N / f_c \right) \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\left\{ \left(\sum k_i a_i m_i - N / f_c \right) \right\}^2 + 2b \sum k_i d_i a_i m_i} \right\} \quad (10.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}_s x_n^{B2} &= \frac{1}{b} \left\{ -\left(\sum k_i a_i m_i + k_{t1} N / f_t \right) \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\left\{ \sum k_i a_i m_i + \frac{k_{t1} N}{f_t} \right\}^2 + 2b \left(\sum k_i d_i a_i m_i + \frac{k_{t1} d_{t1} N}{f_t} \right)} \right\} \quad (10.3)
\end{aligned}$$

$${}_s x_n^C = \frac{\sum (d_i - D) a_i m_i - (d_{t1} - D) N / f_t}{N / f_t - \sum a_i m_i} \quad (10.4)$$

$$({}_s x_n - d_i) < 0 : k_i = n$$

$$({}_s x_n - d_i) \geq 0 : k_i = n-1$$

ここに、 k_i は各段のヤング係数比、 k_{t1} は引張縁に最も近い鉄筋のヤング係数比である。

領域判定後に真の中立軸位置 ${}_s x_n$ が決まる。 ${}_s x_n$ は、ゾーン A では式(10.1)、ゾーン B-1 では式(10.2)、ゾーン B-2 では式(10.3)、ゾーン C では式(10.4)となる。

各領域における許容曲げモーメント算定式を式(11.1)～(11.4)に示す。なお、上付き添字が領域を表している。

$${}_sM_a^A = \frac{f_c}{3} \left\{ ({}_s x_n)^2 b - \frac{({}_s x_n - D)^3}{{}_s x_n} b + (n-1) \sum \frac{({}_s x_n - d_i)^2}{{}_s x_n} a_i m_i \right\} + N(D/2 - {}_s x_n) \quad (11.1)$$

$${}_sM_a^{B1} = f_c \left\{ \frac{b({}_s x_n)^2}{3} + \sum k_i \frac{({}_s x_n - d_i)^2}{{}_s x_n} a_i m_i \right\} + N(D/2 - {}_s x_n) \quad (11.2)$$

$${}_sM_a^{B2} = f_t \left\{ \frac{b({}_s x_n)^2}{3k_{t1}(d_{t1} - {}_s x_n)} x_n + \sum \frac{k_i({}_s x_n - d_i)^2}{k_{t1}(d_{t1} - {}_s x_n)} a_i m_i \right\} + N(D/2 - {}_s x_n) \quad (11.3)$$

$${}_sM_a^C = \sum \frac{({}_s x_n + d_i - D)^2}{{}_s x_n + d_{t1} - D} f_t a_i m_i + N({}_s x_n - D/2) \quad (11.4)$$

5.3 精度

複数のモデルで現行方法と精算方法の許容曲げモーメントを比較した。許容曲げモーメントは軸方向力の大きさに変わるため、1つのモデルに対して軸方向力を変えながら安全率を求め、最も大きい安全率について述べることにする。なお、その時の安全率を mR_s と呼ぶ。軸方向力の上限值は部材の断面積にコンクリートの圧縮許容応力度 f_c を乗じた値、下限値は部材の鉄筋断面積に鉄筋の引張許容応力度 f_t を乗じた値とした。

モデルは、幅 600~2000mm を 100mm 間隔、せい 600~2000mm を 100mm 間隔、鉄筋段数を 1~2 段、各段の鉄筋本数は下限値を 2 本とし、鉄筋間距離を確保できるように本数を変化させた。なお、鉄筋径、鉄筋間距離、かぶり厚、 F_c 、長期時相当は 3 章 1 節と同様である。

図-10 に得られた mR_s の累積頻度分布を示す。横軸は mR_s 、縦軸は%表記した累積頻度である。100%のモデルで危険側の評価であった。最小値は 0.851 であり、現行方法は最大で 17.5%危険側に許容曲げモーメントを評価していることになる。

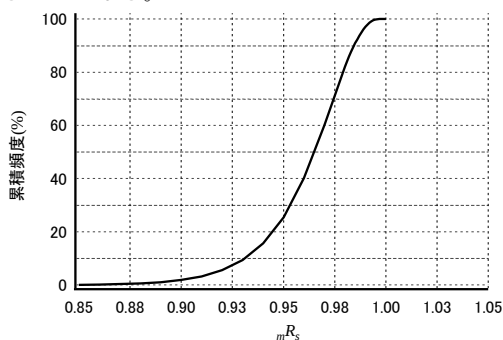


図-10 mR_s の累積頻度分布

mR_s に影響する要因を調査した。どのモデルにおいても、 mR_s はゾーン B-2 の時の許容曲げモーメントの比率であったため、許容応力度に達する引張鉄筋の位置に着目した。その位置は、現行方法では重心位置、精算方法では最も引張縁に近い鉄筋位置である。これらまでの距離である d_t と d_{t1} の比で mR_s をまとめ、図-11 に示す。縦軸

は mR_s 、横軸は d_{t1}/d_t である。 mR_s は d_{t1}/d_t の増加に伴い減少しており、相関係数は 0.982 でよい相関が見られた。

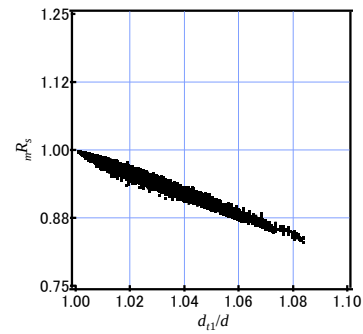


図-11 mR_s と d_{t1}/d_t の関係

6 おわりに

本論文で得られた知見を述べる。2 章では、現行方法と精算方法の許容曲げモーメント算定式を示した。平面保持の仮定から、精算方法では中立軸から離れた鉄筋ほど応力が大きくなると考えており、これにより、応力中心距離および許容曲げモーメントの式の構成が現行方法と異なることを示した。3 章では複数のモデルに対して現行方法と精算方法による許容曲げモーメントの差異を求めており、本論文で扱ったモデルの内、95%で現行方法が過大な許容曲げモーメントを求めており、さらに、その差は最大で 13.5%であることを示した。また、現行方法に対する精算方法の安全率に影響する変数として d_{t1}/d_t と $j d_{t1}/j d_t$ を見出した。4 章では、拡張現行方法として、変数に $j d_{t1}/j d_t$ を用いた手法 1 と d_{t1}/d_t を用いた手法 2 を提案した。手法 1 は計算が煩雑であるが精度は良く、本論文で扱ったモデルであれば、精算方法との誤差は最大で 4.9%であった。手法 2 は簡易に計算できるが、引張鉄筋 1 段圧縮鉄筋多段のモデルでは最大誤差 29.9%であった。5 章では曲げと軸方向力を受ける部材に対して、精算方法を提案した。本論文で扱った全てのモデルに対して現行方法は危険側であり、その差は最大で 17.5%であった。1つのモデルに対して軸方向力を変えた時の最も大きい安全率 mR_s は、 d_{t1}/d_t に従って下がり、概ね、精度よく傾向を表せることがわかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会 鉄筋コンクリート構造計算規準・解説, pp.120-129, 131-132, 191-198, 2010
- 2) 趙 唯堅, 丸山久一: 多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.23, No.490, pp.137-145, 1994.5
- 3) 島津孝広: 多段配筋鉄筋コンクリート材に関する研究, コンクリート・ジャーナル, Vol.4, No.8, pp.1-12, 1966.8