

多段配筋とした RC 梁の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

Proposal of a Formula for Calculating the Allowable Bending Moment of RC Beams with Multi-layer Reinforcement

by

Ryota YANAGIMACHI*¹ and Keisuke NOMURA*²

(Received on, Mar. 31, 2021 and accepted on May. 25, 2021)

Abstract

A method for calculating the allowable bending moment of RC beams is provided in the design standard. The method assumes that the cross-section of RC beams will remain flat after bending. The standard provides an example of calculating the allowable bending moment of RC beams with multi-layer reinforcement, and it is commonly referred to in structural design. However, the example does not assume plane preservation of the cross section, and the calculated allowable bending moment is probably incorrect.

In this paper, we propose a formula for calculating allowable bending moment by applying the assumption of plane preservation to multi-layer RC beams. The stress distributions of the reinforcing bars are different between the proposed method and the calculation example in the standard, and the obtained allowable bending moments are different. The range of these differences in general cross-sectional shapes is described. In addition, the calculation process of the proposed method is more complicated than the example calculation, and so a method to simplify the calculation was considered. The differences between the proposed method and the example are formulated and added to the equation of the example, and a simplified method is proposed.

Keywords: Reinforced concrete, Allowable bending moment, Multi-layer reinforcement, Calculation formula

1. 序論

鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（以降は規準と呼ぶ）には RC 梁の許容曲げモーメントを求める方法¹⁾が示されている。この方法では、曲げによるわん曲後も断面は平面を保つと考えられており、その時の応力度は中立軸位置で 0 であり、そこから線形に変化すると仮定されている。この仮定を基にコンクリート・鉄筋の応力度の算定式が導かれ、さらに、許容曲げモーメントは最大の応力度を許容応力度と置いた時の偶力とされている。また、規準には多段配筋とした RC 梁の計算例が示されており、全ての引張鉄筋の応力度は、それらの鉄筋群の重心位置に発生する前提で求められている。これより規準に示されている計算例の方法（以降は現行方法と呼ぶ）では、Fig. 1(a)のように、鉄筋群内で応力度が同一と考えられていることになる。しかし、平面保持が成り立つとすれば、Fig. 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と考えられる。この考えを元に基準の方法で許容曲げモーメントを求めると、現行方法とは最大応力度の発生位置と偶力の作用距離が異なる

と考えられるが、これらの影響について規準では言及されていない。多段配筋での適切な許容曲げモーメントを得るには、これらの影響を明確にする必要がある。

多段配筋 RC 梁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 梁で曲げ試験を行い、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。

以上を踏まえ本研究では、鉄筋群内での応力の差異を考慮した多段配筋 RC 梁の許容曲げモーメント算定式の提案を目的とする。本論文では、鉄筋群内でも平面保持の仮定を遵守して許容曲げモーメント算定式を導出しており、さらに現行方法との差異も述べている。以降は、この方法を精算方法と呼ぶ。なお、精算方法は現行方法に比べて算定式が複雑であった。そのため、精算方法による許容曲げモーメントの近似値を簡便に求める方法も検討している。既に周知された現行方法を基準に、その算定式に精算方法と現行方法の差異を考慮した式を乗じ、近似値を求める算定式を導出している。以降は、この方

*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

*2 工学部建築学科 講師

法を拡張現行方法と呼ぶ。なお、拡張現行方法は、引張側鉄筋が鉄筋の許容引張応力度 f_t に達した場合についてのみ提案している。また、この拡張現行方法についても精度を述べている。

本論文の構成を述べる。2 章では計算例として示されている現行方法を定式化し、さらに、精算方法の導出過程を述べる。3 章では、現行方法と精算方法の許容曲げモーメントの比例式を導出し、この式を用いて精算方法の近似値を得られるように、拡張現行方法を検討する。4 章では、様々な断面形状の RC 梁に対して現行方法、精算方法、拡張現行方法による許容曲げモーメントの差異を求め、各方法の精度を述べる。5 章では、得られた知見を述べる。

(a)Current method (b)Proposed method

Fig. 1 Assumed stress distribution in cross section.

2. 現行方法の概要と精算方法の提案

2.1 現行方法の概要

現行方法の概要について述べる。RC 規準には多段配筋での計算例は示されているが、算定式としてまとめられていない。精算方法と比較するために、本論では現行方法の算定式を定式化する。また、精算方法と比較するため、変数の名称を RC 規準から変えて表現している。

本論文に用いる変数を Fig. 2 に示す。 b は梁幅、 D は梁せい、 x_n は圧縮縁から中立軸位置までの距離を表している。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 (Fig. 2)。なお、 i は引張縁あるいは圧縮縁側を 1 としている。 c は圧縮、 t は引張の属性であることを表している。

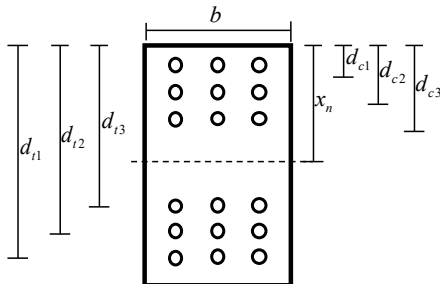


Fig. 2 Cross section variable.

現行方法では、Fig. 1(a)に示したように、鉄筋群内の応力度を同一と考える。これにより、現行方法では鉄筋の断面積、本数、圧縮縁からの距離を引張側あるいは圧縮側で一律に扱うことができる。鉄筋の全断面積 A_t, A_c は(1)式、圧縮縁から鉄筋重心位置までの距離 d_t, d_c は(2)式と表せる。

$$A_t = \sum a_{ti} m_{ti}, A_c = \sum a_{ci} m_{ci} \quad (1)$$

$$d_t = \frac{\sum d_{ti} a_{ti} m_{ti}}{\sum a_{ti} m_{ti}}, d_c = \frac{\sum d_{ci} a_{ci} m_{ci}}{\sum a_{ci} m_{ci}} \quad (2)$$

2.1.1 断面内の各合力

規準には、曲げモーメントの計算は、「RC 梁の曲げモーメントに対する断面算定は曲げ材の各断面は材のわん曲後も平面を保ち、コンクリートの圧縮応力度は中立軸からの距離に比例する」という仮定に基づいて行うと示されている。この仮定に基づく、コンクリートの応力分布は Fig. 3 の赤線のように三角形分布となる。この時の圧縮コンクリート合力 C_c はコンクリートの圧縮縁応力度 σ_c と b, x_n を用いると(3)式と得られる。圧縮・引張鉄筋合力は、中立軸から各鉄筋重心位置までの距離比に応じた応力度に圧縮・引張鉄筋の全断面積を乗じることと求められ、引張鉄筋合力 T_s は(4)、圧縮鉄筋合力 C_s は(5)式と得られる。

$$C_c = \frac{b \sigma_c x_n}{2} \quad (3)$$

$$T_s = n \sigma_c \frac{(d_t - x_n)}{x_n} A_t \quad (4)$$

$$C_s = (n-1) \sigma_c \frac{(x_n - d_c)}{x_n} A_c \quad (5)$$

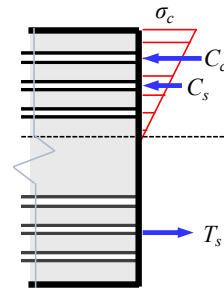


Fig. 3 The resultant force assumed by the current method.

2.1.2 中立軸の算出

断面内の力の釣り合いから中立軸を求める。断面内の力の釣り合いは(6)式の関係になり、これを x_n についてまとめると(7)式と表せる。

$$T_s = C_c + C_s \quad (6)$$

$$x_n = \frac{-\{(n-1)A_c + nA_t\} + \sqrt{\{(n-1)A_c + nA_t\}^2 + 2b\{(n-1)S_c + nS_t\}}}{b} \quad (7)$$

$$S_c = \sum d_{ci} a_{ci} m_{ci}, S_t = \sum d_{ti} a_{ti} m_{ti}$$

2.1.3 許容曲げモーメントの算定式

梁が許容曲げモーメントに達する条件を考える．規準には、「許容曲げモーメントは、圧縮縁がコンクリートの許容圧縮応力度 f_c に達したとき、あるいは引張側鉄筋が鉄筋の許容引張応力度 f_t に達したときに対して求まる値のうち小さい方の数値」と示されている．圧縮縁が f_c に達する条件は(8)式となる．また、鉄筋の応力度は鉄筋群重心位置に発生すると考えられているため、許容応力度に達する引張鉄筋位置は引張鉄筋重心位置 d_t となり、引張鉄筋が f_t に達する条件は(9)式となる．

$$\sigma_c = f_c \quad (8)$$

$$n\sigma_c \frac{(d_t - x_n)}{x_n} = f_t \quad (9)$$

これまでに求めた変数と RC 梁が許容曲げモーメントに達する条件を用いると、現行方法における許容曲げモーメント M_a は(10)式と得られる．式中の M_t は引張鉄筋が f_t に達した場合、 M_c は圧縮縁がコンクリートの f_c に達した場合の許容曲げモーメントであり、 M_a はそれらの小さい方の値である． M_t と M_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、規準では応力中心距離に略算式 $7/8d_t$ を用いる方法が示されているが、本論文では精算方法との比較のため、応力中心距離は圧縮側と引張側の合力間距離を詳細に求めている． j は圧縮・引張鉄筋応力が圧縮・引張鉄筋重心位置に発生するという考えから、合力中心を引張側は鉄筋重心位置、圧縮側は(3),(5)式の合力によって重み付きした距離比として求めている．

$$M_a = \min(M_t, M_c) \quad (10)$$

$$M_t = jT_s = j f_t A_t$$

$$M_c = j(C_s + C_c) = j f_c \left\{ \frac{bx_n}{2} + (n-1) \frac{(x_n - d_c)}{x_n} A_c \right\}$$

$$j = d_t - \frac{C_c \frac{x_n}{3} + C_s d_c}{C_c + C_s} = d_t - \frac{bx_n^3 + 6(n-1)(x_n - d_c)A_c d_c}{3\{bx_n^2 + 2(n-1)(x_n - d_c)A_c\}}$$

2.2 精算方法の提案

鉄筋群内での応力の差異を考慮し、精算方法を提案する．Fig. 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．

2.2.1 断面内の各合力

鉄筋群内での応力の差異を考慮すると断面内の合力は Fig. 4 のようになる．精算方法における各段の圧縮・引張鉄筋合力は、中立軸から各段の鉄筋位置までの距離比に応じた応力度に各段の圧縮・引張鉄筋の断面積を乗じることで求められ、それぞれ(11),(12)式と得られる．なお、 T_{si} は i 段目引張鉄筋合力、 C_{si} は i 段目圧縮鉄筋合力である．圧縮コンクリート合力 C_c は現行方法と考え方が変わらないため、現行方法と同じ(3)式である．

$$T_{si} = n\sigma_c \frac{(d_{ti} - x_n)}{x_n} a_{ti} m_{ti} \quad (11)$$

$$C_{si} = (n-1)\sigma_c \frac{(x_n - d_{ci})}{x_n} a_{ci} m_{ci} \quad (12)$$

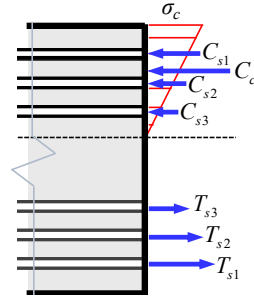


Fig. 4 The resultant force assumed by the proposed method.

2.2.2 中立軸の算出

断面内の力の釣り合いから中立軸を求める．各鉄筋重心位置までの距離 d_t と d_c を用いずに x_n の算定式を表すと、(13)式となる．

$$x_n = \frac{1}{b} \left[-\{(n-1)A_c + nA_t\} + \sqrt{\{(n-1)A_c + nA_t\}^2 + 2b\{(n-1)\sum d_{ci} a_{ci} m_{ci} + n\sum d_{ti} a_{ti} m_{ti}\}} \right] \quad (13)$$

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、(7)式と(13)式で得られる x_n は一致する．

2.2.3 許容曲げモーメントの算出

RC 梁が許容曲げモーメントに達する条件を考える．現行方法では、 f_t に達する引張鉄筋の位置を引張鉄筋重心位置としていた．しかし、平面保持の仮定が成り立つとすれば、最も早く f_t に達する鉄筋は 1 段目引張鉄筋となり、引張鉄筋が f_t に達する条件は(14)式の関係となる．なお、圧縮縁がコンクリートの f_c に達する条件は現行方法と同じであり、(8)式である．

$$n\sigma_c \frac{(d_{t1} - x_n)}{x_n} = f_t \quad (14)$$

これまで求めた変数と条件式を用いると、精算方法における許容曲げモーメント算定式は(15)式と得られる。精算方法でも、 ${}_sM_a$ は ${}_sM_t$ (引張鉄筋が f_t に達する)と ${}_sM_c$ (圧縮縁がコンクリートの f_c に達する)の小さい方としている。現行方法では、引張あるいは圧縮鉄筋重心位置に鉄筋合力が発生する前提で応力中心距離を求めているが、精算方法では、鉄筋群内での応力の差異を考慮し、応力中心距離 ${}_sj$ は各段鉄筋の合力によって重み付きした距離比から求めている。

$${}_sM_a = \min({}_sM_t, {}_sM_c) \quad (15)$$

$${}_sM_t = {}_sj \sum T_{si} = {}_sj f_t \frac{\sum (d_{ti} - x_n) a_{ti} m_{ti}}{(d_{t1} - x_n)}$$

$${}_sM_c = {}_sj (C_c + \sum C_{ci}) = {}_sj f_c \left\{ \frac{bx_n}{2} + (n-1) \frac{\sum (x_n - d_{ci}) a_{ci} m_{ci}}{x_n} \right\}$$

$${}_sj = \frac{\sum (d_{ti} - x_n) a_{ti} m_{ti} d_{ti}}{\sum (d_{ti} - x_n) a_{ti} m_{ti}} - \frac{bx_n^3 + 6(n-1) \sum (x_n - d_{ci}) a_{ci} m_{ci} d_{ci}}{\{3bx_n^2 + 6(n-1) \sum (x_n - d_{ci}) a_{ci} m_{ci}\}}$$

3. 現行方法の拡張

3.1 概要

精算方法は現行方法に比べて算定式が複雑である。また、現行方法は規準に計算例が示されていることもあり、一般的に広く用いられている。そこで本論文では、現行方法の式を基準として、精算方法による許容曲げモーメントの近似値を求められる算定式を提案することとした。具体的には、現行方法の算定式に、現行方法に対する精算方法の比率の式を乗じて求めており、この方法を拡張現行方法と呼んでいる。なお、この比率の式は非常に煩雑であったため、計算値に影響の少ない変数を省略して式の簡略化を試みている。また、一般的な形状の RC 梁においては、引張鉄筋の本数が極端に多い場合や梁せいが極端に小さい場合を除いて、引張鉄筋が許容応力度に達する条件で許容曲げモーメントが求まる。そのため本論文では、この条件に限って拡張現行方法を提案している。

ここで、精算方法の許容曲げモーメント算定式は(16)式と表せる。(16)式中の ${}_crs$ 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であり、(10)式の ${}_cM_t$ と(15)式の ${}_sM_t$ を用いると、 ${}_crs$ は(17)式と表すことができる。 ${}_crs$ の算定式から ${}_crs$ への影響が少ない要因を段階的に簡略化した3つの算定式を提案した。

$${}_sM_t = {}_cM_t \times {}_crs \quad (16)$$

$${}_crs = \frac{{}_sj \sum T_{si}}{{}_cj \sum T_s} \quad (17)$$

3.2 定式化

3.2.1 手法1

まず、圧縮鉄筋に着目した。圧縮鉄筋は、圧縮側のコンクリートに対して断面積が非常に小さいために、負担する応力も小さい。そのため、この応力を無視しても許容曲げモーメントに与える影響は小さいと考えた。(17)式から圧縮鉄筋の項目を削除することで、拡張現行方法の算定式は(18)式と表せる。

$${}_sM_t \approx {}_cM_t \times {}_{e1}r_s \quad (18)$$

$${}_{e1}r_s = \frac{{}_sj \sum T_{si}}{{}_cj \sum T_s}$$

T_{si} と T_s は精算方法および現行方法における引張鉄筋合力であり、 T_{si} は(11)式、 T_s は(4)式である。 ${}_sj$ と ${}_cj$ は精算方法と現行方法の応力中心距離 ${}_sj$ と ${}_cj$ ((15)式および(10)式を参照)から、圧縮鉄筋の項目を削除した応力中心距離である。ここに、

$$\begin{aligned} {}_sj &= \frac{\sum T_{si} d_{ti}}{\sum T_{si}} - \frac{x_n}{3} \\ &= \frac{3(1 + \sum A_k \lambda_k \lambda_{sk}) - X_n(1 + \sum A_k \lambda_{sk})}{3(1 + \sum A_k \lambda_{sk})} d_{t1} \end{aligned}$$

$${}_cj = d_t - \frac{x_n}{3} = \frac{3(1 + \sum A_k \lambda_k) - X_n(1 + \sum A_k)}{3(1 + \sum A_k)} d_{t1}$$

$$A_k = \frac{a_{ik} m_{ik}}{a_{t1} m_{t1}}, \lambda_k = \frac{d_{ik}}{d_{t1}}, \lambda_{sk} = \frac{d_{ik} - x_n}{d_{t1} - x_n}, X_n = \frac{x_n}{d_{t1}}$$

である。なお、式中の k は1段目を除いた鉄筋段数である。また、 $\sum T_{si} \div T_s = (1 + \sum A_k \lambda_{sk}) \div (1 + \sum A_k)$ であるので、(18)式中の ${}_{e1}r_s$ は、

$${}_{e1}r_s = \frac{3(1 + \sum A_k \lambda_k \lambda_{sk}) - X_n(1 + \sum A_k \lambda_{sk})}{3(1 + \sum A_k \lambda_{sk}) - X_n(1 + \sum A_k)} \quad (19)$$

と表すことができる。

3.2.2 手法2

次に、(19)式中の λ_k に着目した。 λ_k は圧縮縁から1段目引張鉄筋までの距離 d_{t1} と2,3段目までの距離 d_{t2}, d_{t3} の比率である。これらの鉄筋までの距離の差異は小さく、 λ_k を1としても許容曲げモーメントへの影響は小さいと考えた。(19)式中の $\lambda_k=1$ と置いた時の拡張現行方法の算定式は(20)式と得られる。

$${}_sM_t \approx {}_cM_t \times {}_{e2}r_s \quad (20)$$

$${}_{e2}r_s = \frac{1 + \sum A_k \lambda_{sk}}{1 + \sum A_k} = \frac{\sum (d_{ti} - x_n) a_{ti} m_{ti}}{(d_{t1} - x_n) \sum a_{ti} m_{ti}} \quad (21)$$

3.2.3 手法3

次に、圧縮縁から中立軸までの距離 x_n に着目した。(21)式では、分母と分子にどちらも「 $-x_n$ 」が含まれている。この項目は、中立軸位置から各段引張鉄筋までの距離 ($d_{ii}-x_n$) であるが、これを単に d_{ii} と置くと式を簡略化できる。(21)式から圧縮縁から中立軸までの距離 x_n を省略した場合の拡張現行方法の算定式は(22)式と得られる。

$${}_sM_t \approx {}_cM_t \times {}_{e3}r_s \quad (22)$$

$${}_{e3}r_s = \frac{\sum d_{ii} a_{ii} m_{ii}}{d_{i1} \sum a_{ii} m_{ii}} \quad (23)$$

4. 現行方法と拡張現行方法の精度

4.1 概要

複数のモデルについて、現行方法、精算方法、拡張現行方法で求めた許容曲げモーメントの差異を調査した。計算条件を Tabel.1 に示す。

梁幅 300,700mm、梁せい 300,2000mm を全て組み合わせた4通りの断面を検討対象とした。鉄筋は、呼び径は D16,22,29 (全て SD345)、段数は圧縮・引張でそれぞれ 1,2,3 段、鉄筋間距離は鉄筋呼び径の 1.5,2.0,2.5 倍、各段の鉄筋本数は下限値を 0 本、上限値を鉄筋間距離が確保できる最大本数とし、その間を 1 本ずつ変化させた。Table.1 中の 50 はかぶり厚+あばら筋の合計である。なお鉄筋の本数は、内側の段の本数は外側の段の本数を超えないように配置している。圧縮縁から圧縮 1 段目鉄筋までの距離を 50mm、コンクリートを Fc=21 (ヤング係数比 $n=15$) とし、引張鉄筋比が 0.4%以上かつ鈎合い鉄筋比以下、複筋比 0.4 以上の条件を満たす 6992 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。

Table 1 Analysis condition.

Beam width b (mm)	300, 700
Beam depth D (mm)	300, 2000
Nominal diameter of Reinforcing bar d (mm)	16, 22, 29
Reinforcing bar type	SD345
Number of layers i	1, 2, 3
Space between reinforcing bars S	$1.5d, 2.0d, 2.5d$
Number of reinforcing bars in each layer m_{ci}, m_{ti}	Lower limit: 1 ($i=1$), 0 ($i=2,3$) Upper limit: Integerize ($(b-50+50)/S+1$)
Fc (N/mm ²)	21
Allowable stress	Long

4.2 拡張現行方法における式の簡略化の影響

拡張現行方法では、式を簡略化するために変数を省略している。変数の省略による解への影響を調査した。こ

こで、現行方法に対する精算方法の比率 ${}_c r_s$ は(17)式である。拡張現行方法でも現行方法との比率の式があり、手法1における比率 ${}_{e1}r_s$ は(19)式、手法2の比率 ${}_{e2}r_s$ は(21)式、手法3の比率 ${}_{e3}r_s$ は(23)式である。これらの関係を Table.1 のモデルに対して求め Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)は精算方法と手法1の関係、(b)は手法2、(c)は手法3との関係である。縦軸は精算方法の比率 ${}_c r_s$ 、横軸は各手法の比率 ${}_{e1}r_s, {}_{e2}r_s, {}_{e3}r_s$ である。各モデルの結果を黒点で表しており、図中の赤線より左上側だと拡張現行方法が精算方法より小さな値を得ていることになる。

手法1では ${}_{e1}r_s$ が ${}_c r_s$ より小さい。精算方法と拡張現行方法の応力中心距離の差異が原因である。拡張現行方法では、圧縮鉄筋を無視しているため圧縮側の合力位置がコンクリートの合力位置になる。これにより、精算方法に比べて応力中心距離が短く、許容曲げモーメントも小さくなっている。また、 ${}_c r_s$ が 1 に近いほど ${}_{e1}r_s$ がより小さいが、 ${}_c r_s=1$ 近傍は精算方法と現行方法に差が少ない、つまり、鉄筋の段数が少ない条件が該当する。圧縮鉄筋の段数が少ないと、精算方法と拡張現行方法の圧縮側合力位置のズレが大きく、差が顕著になったためである。なお、 ${}_c r_s$ と ${}_{e1}r_s$ の相関係数は 0.823 であった。

手法2でも ${}_{e2}r_s$ が ${}_c r_s$ より小さいが、こちらでは、圧縮縁から1段目までと2,3段目までの比率 λ_k を 1 と置いているため、鉄筋段数が多く、 ${}_c r_s$ が 1 から離れるほど ${}_{e2}r_s$ の差が大きい。なお、相関係数は 0.769 であった。

手法3では($d_{ii}-x_n$)を d_{ii} と省略している。精算方法では、現行方法に比べて引張側合力位置が外側にあり、中立軸からその合力位置までの距離が($d_{ii}-x_n$)で考慮されていた。手法3では距離の基準が圧縮縁からの距離 d_{ii} に伸びたため、精算方法と現行方法での距離比よりも差が縮まり、手法3の方が精算方法よりも大きな値となる結果が表れている。なお、相関係数は 0.700 であった。

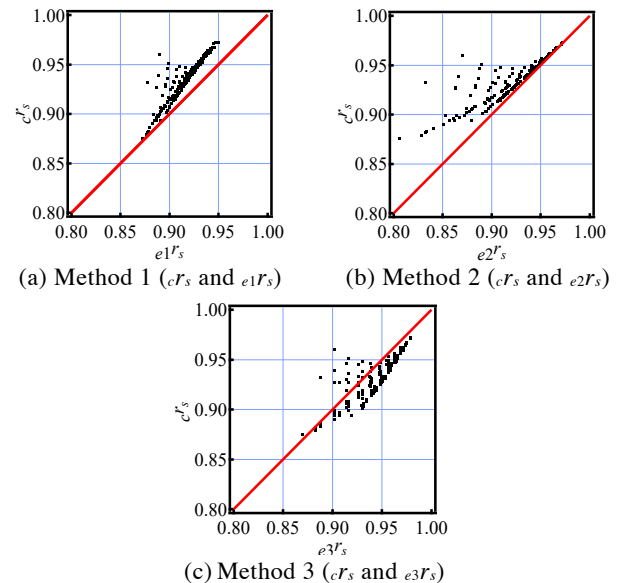


Fig. 5 Difference between exact method and extended current method.

4.3 精度

現行方法と拡張現行方法の精度を調査した。ここで、精算方法に対する現行方法、拡張現行方法の許容曲げモーメントの比率を安全率と呼ぶ。安全率が 1 を超えていれば、現行方法や拡張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。この安全率を、現行方法では cR_s 、拡張現行方法の手法 1 では e_1R_s 、手法 2 では e_2R_s 、手法 3 では e_3R_s と表す。Fig. 6 に安全率の累積頻度分布を示す。縦軸は%表記した累積頻度、横軸は安全率である。

cR_s は 1.028～1.143 の範囲に分布しており、精算方法よりも許容曲げモーメントを最大で 14.3% 分大きく求めている。 e_1R_s は 0.927～0.999、 e_2R_s は 0.906～0.999、 e_3R_s は 0.939～1.032 の範囲に分布している。精算方法との最大の差は、手法 1 で 7.3%、手法 2 で 9.4%、手法 3 で 6.1% であった。

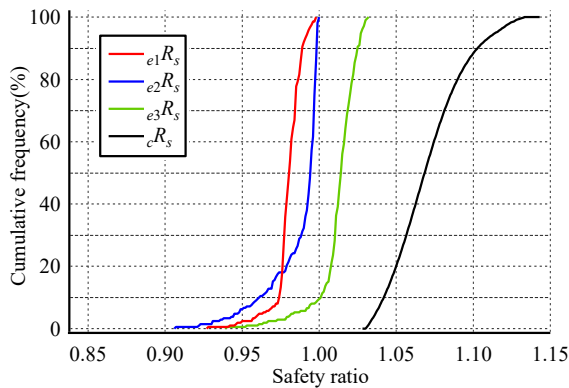


Fig. 6 Cumulative frequency distribution of safety ratio.

手法 1 と手法 2 は、本論文で扱った全てのモデルで安全側の評価であった。手法 1 は比率 e_1R_s を計算するのに多くの変数が必要であり、計算過程も長い。その他の拡張現行方法に比べて最も精度が高い。許容曲げモーメントの差が 3% 未満のモデル数は、全体の約 90% であった。手法 2 は比率 e_2R_s の計算過程が簡易であるが、手法 1 と比べると精度が劣る。手法 1 と同様に、差が 3% 未満のモデル数であれば、全体の約 80% であった。手法 3 は比率 e_3R_s の計算で変数 x_n を必要とせず、鉄筋の断面積、本数と位置だけで計算ができるため、非常に簡易である。一方、本論文で扱ったモデルの約 90% で危険側の評価であった。差は -6.9～3.2% であり、精度としては手法 2 と大きな差は無い。

拡張現行方法はいずれの手法においても現行方法よりも精度よく精算方法の近似値を求められている。

5. 結論

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、拡張現行方法として、現行方法に対する精算方法の比率の式を段階的に簡略化し、現行方法の算定式に乗じることで精算方法の近似値を求める方法を提案しており、圧縮鉄筋の応力度を無視した手法 1、 $\lambda_k=1$ とした手法 2、 x_n を省略した手法 3 を提案した。

4 章では、2 節で拡張現行方法の簡略化による解への影響を調査した。手法 1 では cR_s が 1 に近づくほど精算方法との差が大きくなり、その原因が応力中心距離の相対的な比率の増大であることを示した。手法 2 では、 cR_s が 1 から離れるほど精算方法との差が大きくなり、その原因が鉄筋段数の増加によって、 λ_k を 1 とすることの影響が大きくなったためであることを示した。手法 3 では、手法 2 に近い傾向が見られたが、精算方法より大きくなるモデルがあり、その原因が $(d_{ii}-x_n)$ を d_{ii} とすることで e_3R_s が相対的に大きくなるためであることを示した。3 節では、精算方法に対する現行方法、拡張現行方法の許容曲げモーメントの比率を累積頻度分布で示し、現行方法と拡張現行方法の精度を調査した。現行方法は本論文で扱った全てのモデルで許容曲げモーメントを危険側に評価し、精算方法よりも許容曲げモーメントを最大で 14.3% 分大きく求めている。手法 1 と手法 2 では、本論文で扱った全てのモデルで安全側の評価であった。手法 1 は比率 e_1R_s を計算するのに多くの変数が必要であり、計算過程も長い。その他の拡張現行方法に比べて最も精度が高く、許容曲げモーメントとの差が 3% 未満のモデル数は、全体の約 90% であった。手法 2 は比率 e_2R_s の計算過程が簡易であるが、手法 1 と比べると精度が劣っていた。手法 1 と同様に、精算方法との差が 3% 未満のモデル数であれば、全体の約 80% であった。手法 3 は比率 e_3R_s の計算で変数 x_n を必要とせず、鉄筋の断面積、本数と位置だけで計算ができるため、非常に簡易であるが、本論文で扱ったモデルの約 90% で危険側の評価であった。精算方法との差は -6.9～3.2% であり、精度としては手法 2 と大きな差は無かった。

拡張現行方法は、現行方法の計算に加え、手法毎の比率の計算を必要とするが、いずれの手法においても現行方法より精度よく精算方法の近似値を求められている。

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・同解説, 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).