

矩形・円形・T形 RC 断面の曲げ応力算出マクロに関して

日中構造研究所 松原勝己

同上 朴 永軍

同上 浦野和彦

1. はじめに

多段配筋を有する矩形あるいは円形 RC 断面に対する曲げ応力算出については、以前に分割法によるエクセルマクロを作成しているが、その際に使用した中立軸算定式がやや複雑な形を有していた。一方、建築学会・RC 規準や土木学会・コンクリート標準示方書・旧版によれば、中立軸算定式が換算断面 1 次モーメント、換算断面 2 次モーメントおよび中立軸から偏心軸力までの距離で表されることが提示されている。この表示を利用すれば、ソルバー機能を使用したエクセル表計算で中立軸位置や発生応力が算出できることを示し、曲げ応力計算のエクセルファイルを先に提示した。

上記のエクセルファイルを使用する場合、マクロを含まないので計算手順を把握し易いという利点があるが、一方で多数の断面を一括処理する際には 1 断面に 1 シートのデータを作成する必要があり、データ作成や処理が複雑になるという欠点がある。

そこで、上記の換算断面 1 次および 2 次モーメントを用いる応力度算定方法に基づいた曲げ応力算出マクロを作成したので、以下にデータ入出力や計算手順について説明するものである。

なお、本マクロは自由に使用していただいて結構ですが、結果の妥当性判断は使用者に委ねるものとします。また、ソースコードについても公開しています。

2. 入力データ

入力データは、シート「入力データ 1」と「入力データ 2」に作成する。

2.1 シート「入力データ 1」

複数ケースの断面力や断面諸元の選択等を入力するシートである。以下のデータを入力する。

(1) ケース番号

複数データのケース番号を 1 から順に入力する。ケース番号が空欄になった時点でデータがないと判断し、データ入力を中止する。

(2) 曲げモーメント M (kNm)

複数データの曲げモーメントを、ケースごとに入力する。単位は kNm である。負値（負曲げ）の入力も可能である。矩形および T 形断面に対し曲げモーメントの負値を入力した場合、負曲げを考慮するために、マクロ内において、入力データ 2 で指定される鉄筋被り $cv(i)$ (圧縮縁からの距離) を $h - cv(ndan - i + 1)$ (h : 断面高さ、 $ndan$: 鉄筋段数) に、鉄筋量 $ast(i)$ を $ast(ndan - i + 1)$ に置き換えて計算を実行する。また、T 形断面ではフランジ幅 (b) をウェブ幅 (bw) に、フランジ厚 (t) をウェブ長さ ($h - t$) に、ウェブ厚 (bw) をフランジ幅 (b) に置き換えられる。

(3)軸力 N (kN)

複数データの軸力を、ケースごとに入力する。単位は kN である。圧縮力を正で定義しており、負値を入力した場合、引張力となる。

(4)断面形状

対象とする断面形状を、「矩形」、「円形」および「T 形」のうち、いずれかを入力する。

(5)断面諸元番号

複数データの断面諸元を選定するために定義する番号である。この断面諸元番号により、「入力データ 2(矩形)」、「入力データ 2(円形)」および「入力データ 2(T 形)」の断面諸元番号の断面諸元が使用される。

(6)計算種類

計算種類を選択するための番号である。0、1 および 2 のうちから選択する。それぞれの意味は、以下の通りである。

0：断面諸元を設定し、発生応力の算出を行う。

1：最外引張鉄筋が許容応力度に達するときの最外引張鉄筋量の算出を行う。この場合、最外引張鉄筋量以外の断面諸元の変更は行わない。

2：圧縮縁コンクリートおよび最外引張鉄筋の両者が許容応力度に達する（釣合断面）ときの最外圧縮鉄筋量および最外引張鉄筋量の算出を行う。この場合、最外圧縮鉄筋量と最外引張鉄筋量以外の断面諸元の変更は行わない。なお、このケースで算出された圧縮鉄筋量は負になる場合があるが、これは釣合状態を満足する圧縮鉄筋量が求まらない（圧縮鉄筋が不要）ことを意味する。

(7)説明欄

計算ケースの説明用データを入力する。

(8)中立軸探索範囲 $kk1, kk2$

中立軸位置 x （圧縮縁からの距離）の探索を、 $kk1 \times h < x < kk2 \times h$ （ h ：断面高さ）の範囲で行う。空欄のとき、デフォルト値として $kk1 = -2.1$ 、 $kk2 = 2.0$ が設定される。

(9)軸力作用位置 iflag1

軸力作用位置を設定するフラグである。

1：断面中心に軸力を作用させる。

1 以外：断面の図心位置に軸力を作用させる。

なお、空欄のとき、iflag1=1 が設定される（断面中心とする）。

(10)中立軸チェック用 iflag2

中立軸算定式の左辺値 $f(x)$ を、シート「チェック用」に書き出すためのフラグである。

1：書き出す

1 以外：書き出さない

なお、空欄のとき、iflag2=1 が設定される（書き出す）。

チェック用の書き出しは、中立軸算定式 $f(x)=0$ の左辺値を x とともに出力するものであり、中立軸算出範囲内において解が存在するかどうか、また x による $f(x)$ の変動状況を確認するために使用する。

表 2.1-1 に、シート「入力データ 1」の作成例を示す。

表 2.1-1 シート「入力データ 1」の作成例

ケース番号	曲げモーメント M(kNm)	軸力 N(kN)	断面形状	断面諸元番号 ip(i)	計算種類 ical(i)	説明欄	中立軸探索範囲 kk1	中立軸探索範囲 kk2	軸力作用位置 iflag1	中立軸チェック用 iflag2
1	34.1	69.3	矩形	1	0	常時①		10.0		
2	-24.5	101.0	矩形	1	0	常時②		10.0		
3	22.9	-82.4	矩形	1	0	常時③		10.0		
4	8.5	198.5	矩形	1	0	常時④		10.0		
5	-1.9	-103.1	矩形	2	0	地震時⑤		10.0		

計算種類 ical(i)

0: 断面諸元を設定して発生応力を算出

1: 最外引張鉄筋を許容応力とするように、最外引張鉄筋量を算出

2: コンクリート圧縮線および最外引張鉄筋を許容応力とするように、最外圧縮鉄筋量と最外引張鉄筋量を算出（矩形とT形のみ）

曲げモーメントに負値を入力することも可能である。曲げモーメントに負値を入力した場合、マクロ内において、曲げモーメントを正值に変更し、さらに入力データ2の鉄筋被り $cv(i)$ を $h - cv(ndan+i+1)$ (h : 断面高さ) に、鉄筋量 $ast(i)$ を $ast(ndan+i+1)$ に置き換えて計算を実行する。

軸力は圧縮が正であり、負値を入力すると引張力となる。

中立軸探索範囲 $kk1, kk2$

中立軸位置 x (圧縮線からの距離) の探索を、 $kk1 \leq x < kk2$ (h : 断面高さ) の範囲で行う。空欄のとき、 $kk1=2.1$ 、 $kk2=2.0$ とする。

軸力作用位置 iflag1

iflag1=1 のとき、断面中心に軸力を作用させる。それ以外の場合、図心位置に作用させる。空欄のとき、iflag1=1 とする。

中立軸チェック用 iflag2

iflag2=1 のとき、中立軸算定式の左辺値 $f(x)$ を、シート「チェック用」に書き出す。それ以外の場合、書き出さない。空欄のとき、iflag2=1 とする。

2.2 シート「入力データ 2(矩形)」

シート「入力データ 1」で矩形断面を選択した場合に、複数の断面諸元データを入力するシートである。以下のデータを入力する。

(1) 通し番号

複数の断面諸元データの通し番号を 1 から順に入力する。通し番号が空欄になった時点で断面諸元データがないと判断し、断面諸元データの入力を中止する。

(2) 断面諸元番号

断面諸元の定義する断面諸元番号を入力する。「入力データ 1」に入力した断面諸元番号と同一の番号を「入力データ 2」において探し、同一番号が見つかった時点でその計算ケースの断面諸元として使用する。

(3) 全高 $h_inp(i)$ (cm)

断面高さを cm 単位で入力する。

(4) 断面幅 $b_inp(i)$ (cm)

断面幅を cm 単位で入力する。

(5) コン許容 $sca_inp(i)$ (N/mm²)

コンクリート許容応力度 σ_{ca} を N/mm² 単位で入力する。

(6)鉄筋許容 $ssa_inp(i)$ (N/mm²)

鉄筋許容応力度 σsa を N/mm² 単位で入力する。

(7)鉄筋段数 $ndan_inp(i)$

以下の(8)で入力する鉄筋被りと鉄筋量の段数を入力する。

(8)被り $cv_inp(i,j)$ (cm)、鉄筋量 $ast_inp(i,j)$ (cm²)

第1段の被りおよび第1段の鉄筋量を、それぞれ cm および cm² 単位で入力する。同様に第2段、第3段、および第4段以降の被りと鉄筋量を、(7)の段数分入力する。ここに、鉄筋被りは圧縮縁から鉄筋位置までの距離である。また、第1段を最外圧縮側、最終段を最外引張側の鉄筋データとする。

表 2.2-1 に、シート「入力データ 2(矩形)」の作成例を示す。

表 2.2-1 シート「入力データ 2(矩形)」の作成例

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
矩形断面		断面諸元番号	全高 $h_inp(i)$ (cm)	断面幅 $b_inp(i)$ (cm)	コン許容 σca (N/mm ²)	鉄筋許容 σsa (N/mm ²)	鉄筋段数 $ndan_inp(i)$	第1段		第2段		第3段			
通し番号	被り $cv_inp(i,1)$ (cm)							鉄筋量 $ast_inp(i,1)$ (cm ²)	被り $cv_inp(i,2)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,2)$ (cm ²)	被り $cv_inp(i,3)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,3)$ (cm ²)			
1	1	40	100	8	160	2	12	11.46	28	11.46				常時 4-D19	ctc250mm
2	2	40	100	12	240	2	12	11.46	28	11.46				地震時 4-D19	ctc250mm

鉄筋被りは、正曲げ時の圧縮縁からの距離である。
 多段配筋の入力が可能。第3段以降も同様のフォーマットで入力可能。
 第1段を最外圧縮側、最終段を最外引張側の鉄筋とする

2.3 シート「入力データ 2(円形)」

シート「入力データ 1」で円形断面を選択した場合に、複数の断面諸元データを入力するシートである。以下のデータを入力する。

(1)通し番号

複数の断面諸元データの通し番号を 1 から順に入力する。通し番号が空欄になった時点で断面諸元データがないと判断し、断面諸元データの入力を中止する。

(2)断面諸元番号

断面諸元の定義する断面諸元番号を入力する。「入力データ 1」に入力した断面諸元番号と同一の番号を「入力データ 2」において探し、同一番号が見つかった時点でその計算ケースの断面諸元として使用する。

(3)半径 $rc_inp(i)$ (cm)

断面の半径を cm 単位で入力する。

(4)コン許容 $sca_inp(i)$ (N/mm²)

コンクリート許容応力度 σca を N/mm² 単位で入力する。

(5)鉄筋許容 $\sigma_{sa_inp}(i)$ (N/mm²)

鉄筋許容応力度 σ_{sa} を N/mm² 単位で入力する。

(6)鉄筋段数 $ndan_inp(i)$

以下の(7)で入力する鉄筋被りと鉄筋量の段数を入力する。円形断面の鉄筋では、一周当たりの配筋を1段とする。

(7)半径 $rs_inp(i,j)$ (cm)、鉄筋量 $ast_inp(i,j)$ (cm²)

第1段の半径および第1段の鉄筋量を、それぞれ cm および cm² 単位で入力する。同様に第2段、第3段、および第4段以降の半径と鉄筋量を、(6)の段数分入力する。ここに、半径は円中心から鉄筋位置までの距離(半径)である。また、第1段を最外の鉄筋とする。さらに、鉄筋量は1段分(1周分)の総断面積を入力する。

表 2.3-1 に、シート「入力データ 2(円形)」の作成例を示す。

表 2.3-1 シート「入力データ 2(円形)」の作成例

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	円形断面						第1段		第2段		第3段	
	通し番号	断面諸元番号	半径 $rs_inp(i)$ (cm)	コン許容 σ_{ca} (N/mm ²)	鉄筋許容 σ_{sa} (N/mm ²)	鉄筋段数 $ndan_inp(i)$	半径 $rs_inp(i,1)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,1)$ (cm ²)	被り $rs_inp(i,2)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,2)$ (cm ²)	被り $rs_inp(i,3)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,3)$ (cm ²)
	1	1	100	8	180	1	85	154.84				

多段配筋の入力が可能。第3段以降も同様のフォーマットで入力可能。
第1段を最外の鉄筋とする。

2.4 シート「入力データ 2(T形)」

シート「入力データ 1」で T 形断面を選択した場合に、複数の断面諸元データを入力するシートである。以下のデータを入力する。

(1)通し番号

複数の断面諸元データの通し番号を 1 から順に入力する。通し番号が空欄になった時点で断面諸元データがないと判断し、断面諸元データの入力を中止する。

(2)断面諸元番号

断面諸元の定義する断面諸元番号を入力する。「入力データ 1」に入力した断面諸元番号と同一の番号を「入力データ 2」において探し、同一番号が見つかった時点でその計算ケースの断面諸元として使用する。

(3)全高 $h_inp(i)$ (cm)

T 形断面の断面高さ(全高)を cm 単位で入力する。

(4)フランジ幅 $b_inp(i)$ (cm)

T形断面のフランジ幅を cm 単位で入力する。

(5)フランジ厚 $t_inp(i)$ (cm)

T形断面のフランジ厚を cm 単位で入力する。

(6)ウェブ幅 $bw_inp(i)$ (cm)

T形断面のウェブ幅を cm 単位で入力する。

(7)コン許容 $sca_inp(i)$ (N/mm²)

コンクリート許容応力度 σca を N/mm² 単位で入力する。

(8)鉄筋許容 $ssa_inp(i)$ (N/mm²)

鉄筋許容応力度 σsa を N/mm² 単位で入力する。

(9)鉄筋段数 $ndan_inp(i)$

以下の(10)で入力する鉄筋被りと鉄筋量の段数を入力する。

(10)被り $cv_inp(i,j)$ (cm)、鉄筋量 $ast_inp(i,j)$ (cm²)

第1段の被りおよび第1段の鉄筋量を、それぞれ cm および cm² 単位で入力する。同様に第2段、第3段、および第4段以降の被りと鉄筋量を、(9)の段数分入力する。ここに、鉄筋被りは圧縮縁（フランジ側）から鉄筋位置までの距離である。また、第1段を最外圧縮側、最終段を最外引張側の鉄筋データとする。

表 2.4-1 に、シート「入力データ 2(T形)」の作成例を示す。

表 2.4-1 シート「入力データ 2(T形)」の作成例

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
T形断面										第1段			第2段		第3段	
通し番号	断面諸元番号	全高 $h_inp(i)$ (cm)	フランジ幅 $b_inp(i)$ (cm)	フランジ厚 $t_inp(i)$ (cm)	ウェブ幅 $bw_inp(i)$ (cm)	コン許容 σca (N/mm ²)	鉄筋許容 σsa (N/mm ²)	鉄筋段数 $ndan_inp(i)$	被り $cv_inp(i,1)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,1)$ (cm ²)	被り $cv_inp(i,2)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,2)$ (cm ²)	被り $cv_inp(i,3)$ (cm)	鉄筋量 $ast_inp(i,3)$ (cm ²)		
1	1	40	100	15	50	8	180	2	8	9.95	32	16.3				

鉄筋被りは、正曲げ時の圧縮縁（フランジ側）からの距離である。
多段配筋の入力が可能。第3段以降も同様のフォーマットで入力可能。

2.5 マクロ内で指定するパラメータ

マクロ内で指定するパラメータとして、以下のものがある。

(1) eps_alw

繰り返し計算による中立軸位置算出時の許容誤差で、デフォルト値を 10^{-5} としている。

(2)jcm_{ax}

中立軸位置算出時の最大繰り返し数で、デフォルト値は 50 である。(1)の許容誤差を満足しない場合でも、繰り返し回数が jcm_{ax} を超えると繰り返し計算をストップし、次の計算ケースに移行する。

(3)eps_alw₂

「入力データ 1」の「計算種類 1」のとき、引張鉄筋量算出のための繰り返し計算における許容誤差である。デフォルト値は 10⁻³ としている。

(4)jcm_{ax2}

「入力データ 1」の「計算種類 1」のとき、引張鉄筋量算出のための繰り返し計算における最大繰り返し数である。デフォルト値は 100 としている。(3)の許容誤差を満足しない場合でも、繰り返し回数が jcm_{ax2} を超えると繰り返し計算をストップし、次の計算ケースに移行する。

2.6 配列の大きさの制限

本マクロでは、データの数に関して、以下の制限がある。

- ・ 計算ケースの総数(na1) : 1000 以内
- ・ 断面諸元の総数(na2) : 20 以内
- ・ 鉄筋の総段数(na3) : 20 以内
- ・ 中立軸計算の繰り返し数(na4) : 50 以内

データ数が上記の制限を超えた場合、計算がストップするので、ソースコード内の na1~na5 の値を大きく設定し直す必要がある。

3. 出力データ

出力データは、シート「応力度」、「中立軸計算」および「チェック用」の 3 つのシートに出力される。

3.1 シート「応力度」

以下の 19 個のデータが出力される。

(1)ケース番号

「入力データ 1」で入力したケース番号が出力される。

(2)説明欄

「入力データ 1」で入力したケース番号が出力される。

(3)計算種類

「入力データ 1」で入力した計算種類 (0~2) が出力される。

(4)断面諸元番号

「入力データ 1」で入力した断面諸元番号が出力される。

(5)mf (kNm)

「入力データ 1」で入力された曲げモーメントが出力される。

(6)nf (kN)

「入力データ 1」で入力された軸力が出力される。

(7)x (cm)

中立軸位置（圧縮縁から中立軸までの距離）が cm 単位で出力される。

(8)σc (N/mm²)

コンクリート圧縮縁の発生応力が N/mm² 単位で出力される。圧縮が正である。

ただし、矩形断面でかつ全断面引張（中立軸位置 $x < 0$ ）のとき、全断面有効の条件で引張縁でのコンクリート応力（引張応力で負値）を出力する。

(9)σs (N/mm²)

最外引張鉄筋の発生応力が N/mm² 単位で出力される。引張が正である。

(10)σs' (N/mm²)

最外圧縮鉄筋の発生応力が N/mm² 単位で出力される。引張が正である。

(11)σca (N/mm²)

データ 1 で入力されたコンクリート許容応力度が N/mm² 単位で出力される。

(12)σsa (N/mm²)

データ 1 で入力された鉄筋許容応力度が N/mm² 単位で出力される。

(13)照査値 σc/σca

コンクリート許容応力度に対するコンクリート発生応力の比が出力される。

(14)照査値 σs/σsa

鉄筋許容応力度に対する引張鉄筋の発生応力の比が出力される。

(15)判定(σc)

コンクリート応力に関し、照査値が 1.0 未満のとき「OK」、1.0 以上のとき「NG」を出力する。

(16)判定(σs)

鉄筋引張応力に関し、照査値が 1.0 未満のとき「OK」、1.0 以上のとき「NG」を出力する。

(17)最外引張鉄筋量 (cm²)

計算種類が 1 あるいは 2 の場合、引張鉄筋が許容応力に達するとき、あるいは引張鉄筋および圧縮縁コンクリートの両方が許容応力に達するときの最外引張鉄筋量を出力する。

(18)最外圧縮鉄筋量 (cm²)

計算種類が 2 のとき、引張鉄筋および圧縮縁コンクリートの両方が許容応力に達するときの最外圧縮鉄筋量を出力する。

(19)繰り返し数 it

計算種類が 1 のとき、最外引張鉄筋量を求めるための繰り返し計算の収束回数を出力する。繰り返し計算の最大数を 100 と設定しているため、100 を出力した時にはチェックが必要である。また、計算種類が 0 あるいは 2 のときは、この繰り返し計算は行わないので、1 が出力される。

表 3.1-1 に、シート「応力度」の出力例を示す。

(20)σc1 (N/mm²)

矩形断面でかつ全断面引張（中立軸位置 $x < 0$ ）のとき、全断面有効の条件で圧縮縁でのコンクリート応力（引張応力で負値）を出力する。

表 3.1-1 シート「応力度」の出力例

ケース番号	説明欄	断面形状	計算種別	断面諸元番号	mf(kNm)	mf(kN)	x(cm)	σ c(N/mm ²)	σ s(N/mm ²)	σ s(N/mm ²)	σ ca(N/mm ²)	σ sa(N/mm ²)	σ c(N/mm ²)	照査値 σ c / σ_{ca}	照査値 σ s / σ_{sa}	判定(σ_c)	判定(σ_s)	最大引張鉄筋量(cm ²)	最大圧縮鉄筋量(cm ²)	繰り返し回数	σ c1(N/mm ²)
1	常時①	矩形	0	1	34.1	69.3	10.542	3.167	78.669	6.569	8	160	0.396	0.492	OK	OK			1		
2	常時②	矩形	0	1	-24.5	101.0	13.355	2.034	33.461	-3.096	8	160	0.254	0.209	OK	OK			1		
3	常時③	矩形	0	1	22.9	-82.4	6.774	2.478	116.457	28.671	8	160	0.310	0.728	OK	OK			1		
4	常時④	矩形	0	1	8.5	198.5	49.865	0.763	-5.021	-8.691	8	160	0.095	-0.031	OK	—			1		
5	地震時⑤	矩形	0	2	-1.9	-103.1	-15.015	-0.305	55.249	34.698	12	240	-0.025	0.230	—	OK			1	-0.169	

出力項目の説明

- ・断面形状：矩形、T形および円形断面の区別
- ・計算種別：0のとき応力度計算、1のとき最大引張鉄筋量の算出、2のとき最大圧縮・引張鉄筋量の算出
- ・mf：作用曲げモーメント（圧縮が正）
- ・nf：作用軸力（圧縮が正）
- ・x：圧縮線から中立軸までの距離
- ・oc：圧縮線コンクリート応力（圧縮が正）
- ・os：最大引張鉄筋応力（引張が正）
- ・os'：最大圧縮鉄筋応力（引張が正）
- ・oca：コンクリートの許容圧縮応力度
- ・osa：鉄筋の許容引張応力度
- ・oca/osa：コンクリート許容応力に対するコンクリート発生応力の比
- ・osa/osa：鉄筋許容応力に対する鉄筋発生応力の比
- ・判定（oc）：コンクリート応力の安全性判定（OKあるいはNG）
- ・判定（os）：鉄筋引張応力の安全性判定（OKあるいはNG）
- ・最大引張鉄筋量：計算種類1あるは2のとき、計算された最大引張鉄筋量出力される
- ・最大圧縮鉄筋量：計算種類2のとき、計算された最大圧縮鉄筋量出力される
- ・it：計算種類1のとき、最大引張鉄筋量を求める計算に要した繰り返し回数
- ・oc1：全断面引張時のとき、圧縮線のコンクリート応力が出力される

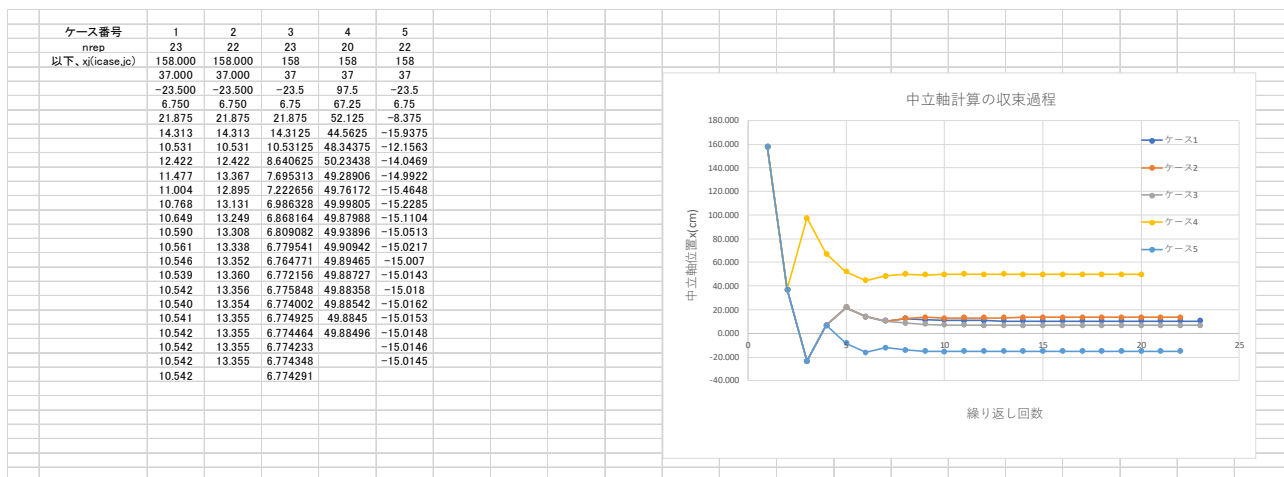
3.2 シート「中立軸計算」

計算種類が0あるいは1のとき、中立軸位置を求める繰り返し計算の収束状況を出力するシートである。

出力項目は、ケース番号 *icase*、収束に至るまでの繰り返し数の総数 *nrep*、および中立軸位置 *xj(icase,jc)* (ケース番号 *icase*、*jc* 回目の繰り返しにおける中立軸位置の値) である。

表 3.2-1 に、出力例を示す。

表 3.2-1 シート「中立軸計算」の出力例



3.3 シート「チェック用」

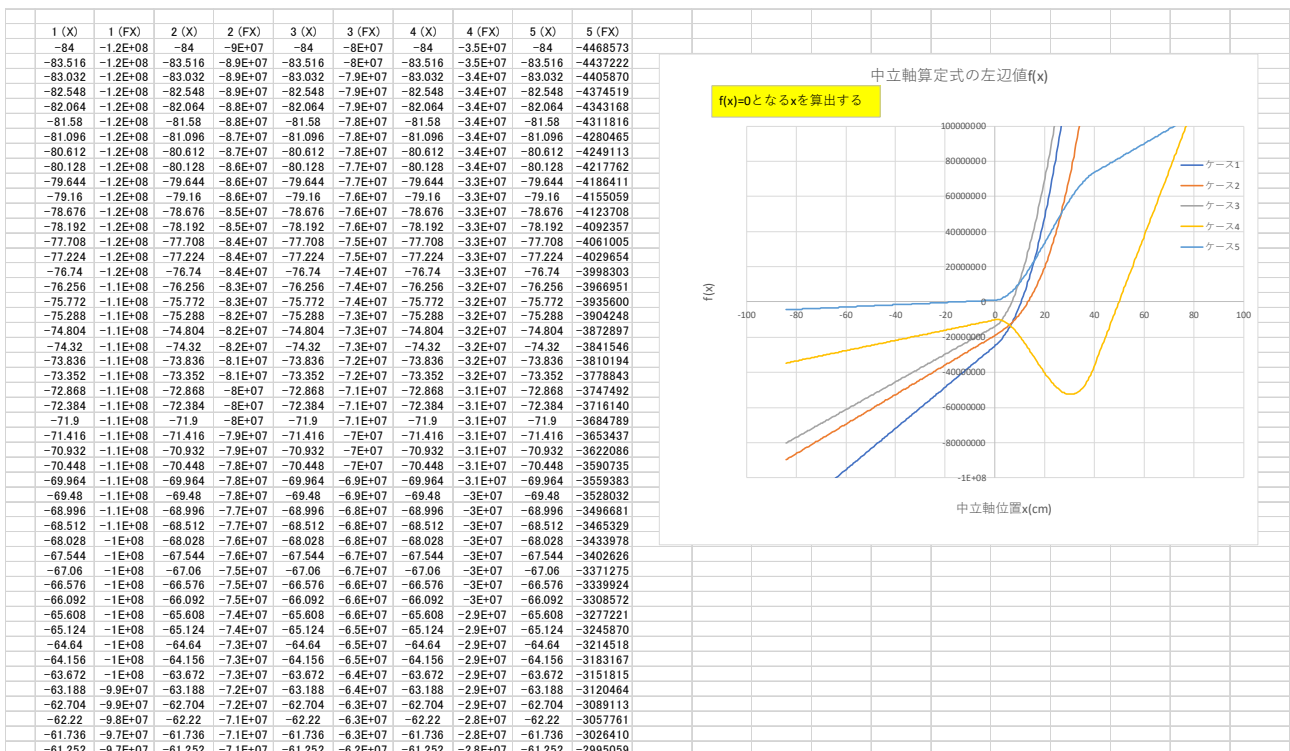
中立軸算定式 $f(x)=0$ の左辺値 $f(x)$ の値を、 x の探索範囲において出力するシートである。

現マクロでは、 $kk1 \times h \leq x \leq kk2 \times h$ (デフォルト値 : $kk1=-2.1, kk2=2.0$) の範囲内において中立軸位置 x の探索を行っている。その際、 x の探索範囲において、 $f(x)$ の符号変化があること (x の探索範囲においてグラフ $y=f(x)$ が X 軸を横切る) を仮定している。このシートにより、 $f(x)$ の符号変化や変動状況を確認する。もし、探索範囲において $f(x)$ の符号変化が無いときには、中立軸位置を算出せず、 $x=999$ (解が無い) が出力される。この場合、シート「入力データ 1」の $kk1$ や $kk2$ を適宜修正して対処する。

例えば、「3(X)」および「3(FX)」とあるのは、それぞれケース番号 3 の中立軸位置 x と中立軸算定式の左辺値 $f(x)$ を示す。

表 3.3-1 に、出力例を示す。

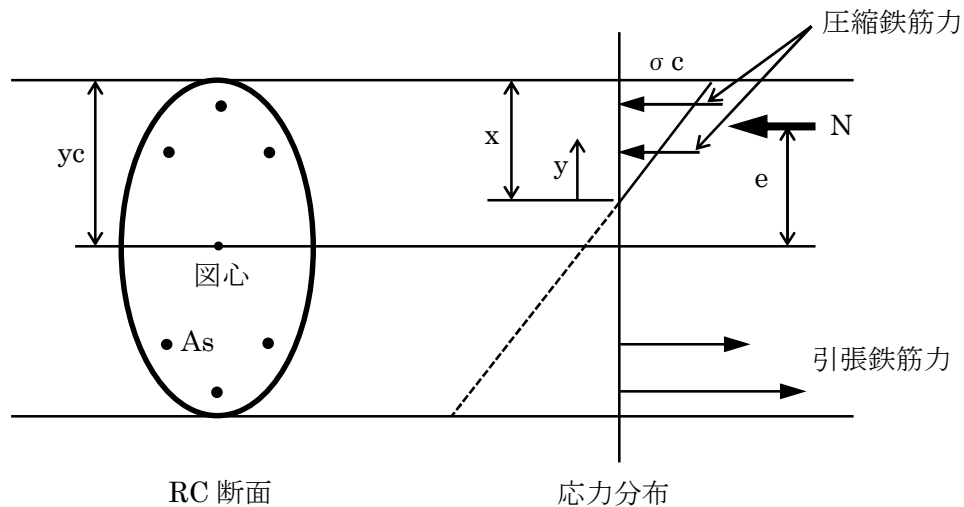
表 3.3-1 シート「チェック用」の出力例 (一部)



4. 応力度計算の定式

4.1 中立軸位置の算定

応力算出時の断面仮定を、図 4.1-1 に示す。



【記号】

y_c : 圧縮縁から断面図心までの距離、 A_s : 鉄筋断面積

x : 圧縮縁から中立軸までの距離、 σ_c : 圧縮縁におけるコンクリート応力

y : 中立軸から圧縮縁方向を正とした距離 (y の位置でのコンクリート応力は $\sigma_c \cdot y/x$ となる)

N : 作用軸力

e : 偏心距離 (作用曲げモーメント M を考慮した軸力偏心位置から図心までの距離、 $e=M/N$)

図 4.1-1 断面仮定 (建築 RC 規準より引用・修正)

図 4.1-1 を参照し、断面軸方向の力の釣り合い、および中立軸周りのモーメントの釣り合いから、次式が成立する。

$$N = \int \sigma_c \frac{y}{x} dA + \sum n \sigma_c \frac{y}{x} A_s \quad (1)$$

$$N(x - y_c + e) = \int \sigma_c \frac{y^2}{x} dA + \sum n \sigma_c \frac{y^2}{x} A_s \quad (2)$$

ここに、 n はヤング係数比であり、許容応力度法では $n=15$ が一般的に使用される。また、積分記号はコンクリート応力、総和記号は鉄筋応力に関するものであり、コンクリートについては圧縮領域に対する積分 (dA は中立軸から y だけ離れた位置におけるコンクリート断面の微小面積) を、鉄筋については全鉄筋の総和を意味している。さらに、中立軸から y だけ離れた位置でのコンクリートおよび鉄筋の応力が、それぞれ $\sigma_c \cdot y/x$ および $n \sigma_c \cdot y/x$ で表されることを考慮している。

なお、式(1)および(2)において、 σ_c および x は積分および総和記号に依存しないが、 y および A_s は積分および総和記号に依存する。また、軸力 N は圧縮を正と定義している。

ここで、中立軸に関する換算断面 1 次モーメント G_x および中立軸に関する換算断面 2 次モーメント I_x を定義すれば、式(1)および(2)は以下のように書き換えることができる。

$$N = \frac{\sigma_c}{x} G_x \quad (3)$$

$$N(x - y_c + e) = \frac{\sigma_c}{x} I_x \quad (4)$$

$$\text{ここに、 } G_x = \int y dA + \sum nA_s y \quad (5)$$

$$I_x = \int y^2 dA + \sum nA_s y^2 \quad (6)$$

上記の式(5)および(6)の換算 1 次および 2 次モーメントは、コンクリートについては、引張部分の寄与を無視し、鉄筋については断面積の n 倍の寄与を考慮するものである。

式(3)および(4)より、 N 、 σ_c および x を消去すれば、次式が得られる。

$$x - y_c + e = \frac{I_x}{G_x} \quad (7)$$

ここで、 $x - y_c + e$ は、中立軸から曲げモーメントを考慮した軸力偏心位置までの距離であり、これを d_x と定義すれば、次式となる。

$$d_x = \frac{I_x}{G_x} \quad (8)$$

ここに、 $d_x = x - y_c + e$

式(8)は、中立軸周りの換算断面 2 次モーメント I_x を換算断面 1 次モーメント G_x で除した値が、中立軸から軸力偏心位置までの距離 d_x に等しいことを示している。上記の式(7)あるいは(8)が、中立軸位置 x を求めるための方程式となる。なお、式(8)については、「土木学会：コンクリート標準示書解説・参考篇（1936 年発行）」においても提示されているものである。

式(7)において、 y_c は断面諸元（断面形状、鉄筋量および鉄筋配置）によって決まり、偏心距離 $e (=M/N)$ は作用断面力によって決まるのに対し、 x 、 I_x および G_x については中立軸位置に依存するために、陽な形で x を定めることができない。したがって、 x の算定に繰り返し計算が必要になる。エクセルにおいて断面諸元を定義しておけば、エクセルのソルバー機能を用いることで算出可能であるが、本報告では多くの断面諸元に対する一括処理を実行するために、エクセルマクロを使用する。

式(7)で、 $e=M/N$ を考慮すれば、次式を得る。

$$G_x = \frac{I_x N}{N(x - y_c) + M} \quad (9)$$

中立軸算定式として、式(7)あるいは(8)を用いることもできるが、軸力がゼロ ($N=0$) のときゼロ割りが生じるので、式(9)を使用すると $N=0$ の場合でも対応可能である。なお、式(9)より $N=0$ のとき $G_x=0$ となることがわかる。

さらに、式(9)を変形すれば、次式が得られる。

$$\{G_x(x - y_c) - I_x\}N + G_x M = 0 \quad (11)$$

本報告のエクセルマクロでは、式(11)の左辺を $f(x)$ と置き、 $f(x)=0$ を中立軸算定式として使用することとする。

すなわち、

$$\text{中立軸算定式： } f(x) = 0 \quad (11b)$$

$$\text{ここに、 } f(x) = \{G_x(x - y_c) - I_x\}N + G_x M \quad (11c)$$

G_x ：中立軸周りの換算断面 1 次モーメント

I_x ：中立軸周りの換算断面 2 次モーメント

x ：中立軸から圧縮縁までの距離、 y_c ：図心から圧縮縁までの距離

N ：軸力、 M ：曲げモーメント

4.2 換算断面 1 次および 2 次モーメント

(1) 矩形断面

矩形 RC 断面を対象とした場合、式(11)に用いる換算断面 1 次モーメント G_x および換算断面 2 次モーメント I_x は、次式で表すことができる。

$$G_x = \begin{cases} \frac{bx^2}{2} + \sum nA_{si}(x - c_i) & (0 \leq x \leq h) \\ bh\left(x - \frac{h}{2}\right) + \sum nA_{si}(x - c_i) & (x > h) \\ \sum nA_{si}(x - c_i) & (x < 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$I_x = \begin{cases} \frac{bx^3}{3} + \sum nA_{si}(x - c_i)^2 & (0 \leq x \leq h) \\ \frac{bh^3}{12} + bh\left(x - \frac{h}{2}\right)^2 + \sum nA_{si}(x - c_i)^2 & (x > h) \\ \sum nA_{si}(x - c_i)^2 & (x < 0) \end{cases} \quad (13)$$

ここに、 h : 断面高さ

b : 断面幅

x : 圧縮縁から中立軸までの距離

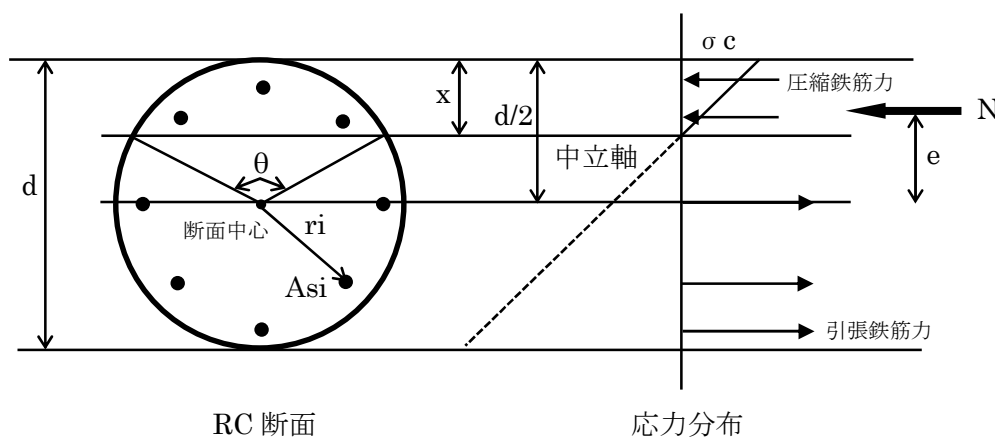
n : ヤング係数比 (=15)

A_{si} : i 段目鉄筋の断面積

c_i : i 段目鉄筋の圧縮縁から中立軸までの距離

(2) 円形断面

円形断面の断面仮定を、図 4.2-1 に示す。



【記号】

d : 断面直径、 r_i : i 段目の鉄筋位置の半径、 A_{si} : i 段目の鉄筋断面積 (1 周分)

θ : コンクリート圧縮領域の中心角

x : 圧縮縁から中立軸までの距離

σ_c : コンクリート圧縮縁の応力

e : 曲げモーメントを考慮した偏心軸力と断面中心との距離 ($e=M/N$)

N : 作用軸力

図 4.2-1 円形断面の断面仮定

まず、中立軸が断面内 ($0 \leq x \leq d$) にあるとき、中立軸周りの換算断面 1 次モーメントおよび換算断面 2 次モーメントの算定式を求める。

鉄筋に対する中立軸周りの換算断面 1 次モーメント G_{xs} および換算断面 2 次モーメント I_{xs} は、次式で表すことができる。

$$G_{xs} = \sum \frac{nA_{si}}{2} (2x - d) \quad (14)$$

$$I_{xs} = \sum \frac{nA_{si}}{4} \{2r_i^2 + (2x - d)^2\} \quad (15)$$

ここに、 n : ヤング係数比 (=15)、 x : 圧縮縁から中立軸までの距離

d : 断面直径、 A_{si} : 第 i 段の鉄筋断面積、 r_i : 第 i 段の鉄筋位置の半径

コンクリート圧縮部分に対する中立軸周りの換算断面 1 次モーメント G_{xc} および換算断面 2 次モーメント I_{xc} は、コンクリート圧縮部分の形状が弓形であることから、以下のように定めることができる。

圧縮域 (弓形) の面積 A 、円中心から圧縮域円心までの距離 y_G および圧縮域の円中心周りの断面 2 次モーメント I_0 は、次式で表される。

$$A = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2}{2} (\theta - \sin\theta) \quad (16)$$

$$y_G = \frac{4}{3} \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{\sin^3 \frac{\theta}{2}}{\theta - \sin\theta} \quad (17)$$

$$I_0 = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^4}{8} \left(\theta - \sin\theta + 2\sin\theta \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (18)$$

$$\theta = 2\cos^{-1} \frac{d-2x}{d} \quad (19)$$

ここに、 θ : コンクリート圧縮部分 (圧縮縁から中立軸までの弓形部分) の中心角

上式を用い、コンクリート部分の中立軸周りの換算断面 1 次モーメント G_{xc} は、次式となる。

$$G_{xc} = \left(y_G - \frac{d}{2} + x \right) A \quad (20)$$

また、コンクリート部分の中立軸周りの換算断面 2 次モーメント I_{xc} は、次式となる。

$$I_{xc} = I_0 + A \left\{ \left(y_G - \frac{d}{2} + x \right)^2 - y_G^2 \right\} \quad (21)$$

以上より、円形断面に対する中立軸周りの換算断面 1 次モーメント G_x および換算断面 2 次モーメント I_x は、中立軸が断面内 ($0 \leq x \leq d$) にある場合、次式で表すことができる。

$$G_x = G_{xc} + G_{xs} = \left(y_G - \frac{d}{2} + x \right) A + \sum \frac{nA_{si}}{2} (2x - d) \quad (22)$$

$$I_x = I_{xc} + I_{xs} = I_0 + A \left\{ \left(y_G - \frac{d}{2} + x \right)^2 - y_G^2 \right\} + \sum \frac{nA_{si}}{4} \{2r_i^2 + (2x - d)^2\} \quad (23)$$

次に、中立軸が引張側の断面外 ($x > d$) にあるとき、 G_x および I_x は次式で表すことができる。

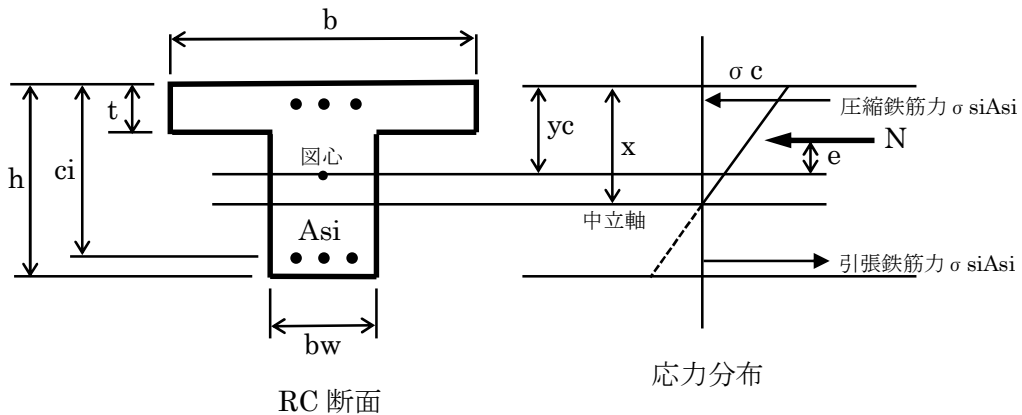
$$G_x = \frac{\pi d^2}{4} \left(x - \frac{d}{2} \right) + \sum \frac{nA_{si}}{2} (2x - d) \quad (24)$$

$$I_x = \frac{\pi}{64} d^4 + \frac{\pi d^2}{4} \left(x - \frac{d}{2} \right)^2 + \sum \frac{nA_{si}}{4} \{2r_i^2 + (2x - d)^2\} \quad (25)$$

さらに、中立軸が圧縮側の断面外 ($x < 0$) にあるときの G_x および I_x については、式(14)および(15)の鉄筋分のみの寄与となる。

(3) T形断面

T形断面の断面仮定を、図 4.2-2 に示す。



【記号】

- b : フランジ幅、t : フランジ厚さ、h : 全断面高さ、bw : ウェブ幅
- yc : 圧縮縁から図心位置までの距離、x : 圧縮縁から中立軸までの距離
- e : 偏心距離 (曲げモーメント M を考慮した軸力偏心位置から図心までの距離、 $e=M/N$)
- σ_c : コンクリート圧縮縁の応力、 σ_{si} : i 段目鉄筋の応力
- c_i : i 段目鉄筋の被り (断面高さ方向の圧縮縁から鉄筋までの距離)
- A_{si} : i 段目鉄筋の断面積
- N : 作用軸力

図 4.2-2 T形断面の断面仮定

T形 RC 断面の換算断面 1 次モーメント G_x および換算断面 2 次モーメント I_x は、次式で表すことができる。

$$G_x = \begin{cases} \sum nA_{si}(x - c_i) & (x < 0) \\ \frac{bx^2}{2} + \sum nA_{si}(x - c_i) & (0 \leq x < t) \\ bt\left(x - \frac{t}{2}\right) + \frac{b_w(x-t)^2}{2} + \sum nA_{si}(x - c_i) & (t \leq x \leq h) \\ bt\left(x - \frac{t}{2}\right) + b_w(h-t)\left(x - \frac{h+t}{2}\right) + \sum nA_{si}(x - c_i) & (x > h) \end{cases} \quad (35)$$

$$I_x = \begin{cases} \sum nA_{si}(x - c_i)^2 & (x < 0) \\ \frac{bx^3}{3} + \sum nA_{si}(x - c_i)^2 & (0 \leq x < t) \\ \frac{bt^3}{12} + bt\left(x - \frac{t}{2}\right)^2 + \frac{b_w(x-t)^3}{3} + \sum nA_{si}(x - c_i)^2 & (t \leq x \leq h) \\ \frac{bt^3}{12} + bt\left(x - \frac{t}{2}\right)^2 + \frac{b_w(h-t)^3}{12} + b_w(h-t)\left(x - \frac{h+t}{2}\right)^2 + \sum nA_{si}(x - c_i)^2 & (x > h) \end{cases} \quad (36)$$

ここに、h : 全断面高さ、t : フランジ厚さ、b : フランジ幅、bw : ウェブ幅

x : 圧縮縁から中立軸までの距離

n : ヤング係数比 (=15)

A_{si} : i 段目鉄筋の断面積

c_i : i 段目鉄筋の圧縮縁から中立軸までの距離

4.3 発生応力度

コンクリートおよび鉄筋の発生応力を求める。

式(4)において、 $e=M/N$ を考慮すれば、コンクリート圧縮縁における応力 σ_c として、次式を得る。

$$\sigma_c = \frac{N(x-y_c)+M}{I_x} x \quad (37)$$

式(37)に、中立軸位置 x を代入することで、コンクリート圧縮縁の応力値を求めることができる。

また、鉄筋応力 σ_s については、断面高さ方向の応力分布の直線性を考慮し、以下の式で表すことができる。ここに、鉄筋応力 σ_s は引張を正と定義した。

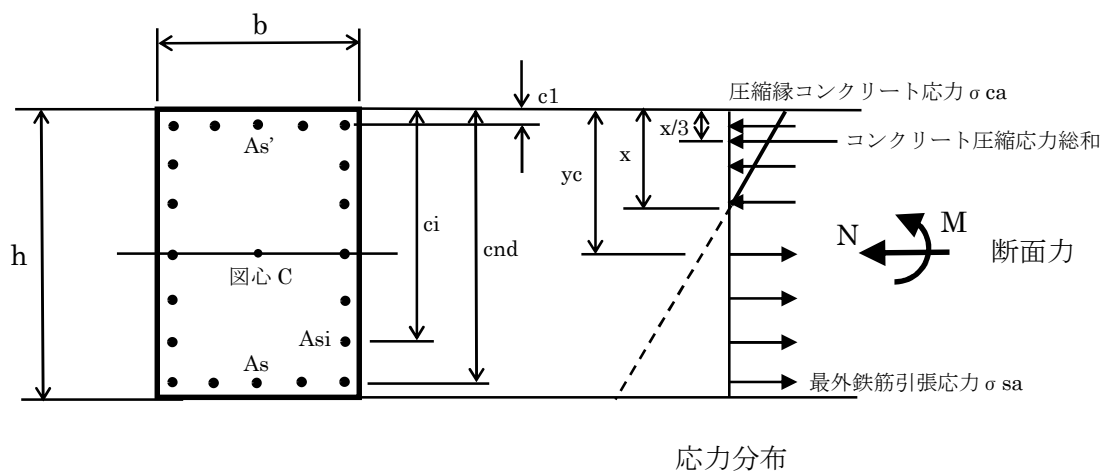
$$\sigma_s = -\frac{x-c}{x} n\sigma_c \quad (38)$$

ここに、 c は、圧縮縁から鉄筋位置までの断面高さ方向の距離（圧縮縁からの被り厚さ）である。

5. 圧縮および引張鉄筋量の算出に関して

コンクリート圧縮縁と最外引張鉄筋が同時に許容応力度に達するとき（釣合断面）、最外圧縮鉄筋量と最外引張鉄筋量の算定式を誘導する（計算種類2のとき）。

図5-1に、釣合断面における断面仮定を示す。



【記号】

h : 断面高さ

b : 断面幅

As' : 最外圧縮鉄筋量

As : 最外引張鉄筋量

As_i : 第 i 段目の鉄筋量

c_1 : 最外圧縮鉄筋の被り（圧縮縁からの距離）

c_i : 第 i 段目の鉄筋の被り（圧縮縁からの距離）

c_{nd} : 最外引張鉄筋の被り（圧縮縁からの距離）

nd : 鉄筋総段数

y_c : 圧縮縁から図心までの距離

x : 圧縮縁から中立軸までの距離

σ_{ca} : コンクリート許容応力度（釣合断面において圧縮縁応力が σ_{ca} ）

σ_{sa} : 鉄筋許容応力度（釣合断面において最外引張鉄筋応力が σ_{sa} ）

M : 曲げモーメント

N : 軸力

図5-1 断面仮定（釣合断面）

以下では、断面力 M および N が既知のとき、コンクリート圧縮縁応力と最外引張鉄筋応力が同時に許容応力となる条件を満足する最外圧縮鉄筋量 As' と最外引張鉄筋量 As を求める。このとき、最外鉄筋以外の鉄筋量、断面高さおよび断面幅は変化させないものとする。また、軸力は断面中心に作用するものと仮定し、 $y_c = h/2$ とする。

コンクリート圧縮縁と引張鉄筋が両方とも許容応力度に達する条件から、中立軸位置 x を以下の通り求めることができる。

$$x = \frac{n\sigma_{ca}}{n\sigma_{ca} + \sigma_{sa}} c_{nd} \quad (39)$$

最外圧縮鉄筋位置周りのモーメントの釣り合いにより、次式が成立する。

$$M - N(y_c - c_1) = \sigma_{sa} A_s (c_{nd} - c_1) - \frac{bx}{2} \sigma_{ca} \left(\frac{x}{3} - c_1 \right) - \sum_2^{nd-1} n \sigma_{ca} \frac{x-c_i}{x} A_{si} (c_i - c_1) \quad (40)$$

ここに、 n はヤング係数比 (=15) であり、第 i 段目の鉄筋応力は応力の直線分布を考慮し、 $n \sigma_{ca}(x-c_i)/x$ として求めた。

式(40)を A_s について解けば、次式を得る。

$$A_s = \frac{M + N(c_1 - y_c) + \frac{bx}{2} \sigma_{ca} \left(\frac{x}{3} - c_1 \right) + \sum_2^{nd-1} n \sigma_{ca} \frac{x-c_i}{x} A_{si} (c_i - c_1)}{\sigma_{sa} (c_{nd} - c_1)} \quad (41)$$

最外引張鉄筋周りのモーメントの釣り合いにより、次式が成立する。

$$M + N(c_{nd} - y_c) = \frac{bx}{2} \sigma_{ca} \left(c_{cd} - \frac{x}{3} \right) + \sigma'_s A'_s (c_{nd} - c_1) + \sum_2^{nd-1} n \sigma_{ca} \frac{x-c_i}{x} A_{si} (c_{nd} - c_i) \quad (42)$$

ここに、 σ'_s は最外縁圧縮鉄筋の応力であり、次式で表される。

$$\sigma'_s = n \sigma_{ca} \frac{x-c_1}{x} \quad (43)$$

式(42)を A'_s について解けば、次式を得る。

$$A'_s = \frac{M + N(c_{nd} - y_c) - \frac{bx}{2} \sigma_{ca} \left(c_{nd} - \frac{x}{3} \right) - \sum_2^{nd-1} n \sigma_{ca} \frac{x-c_i}{x} A_{si} (c_{nd} - c_i)}{\sigma'_s (c_{nd} - c_1)} \quad (44)$$

以上より、断面力 M および N が既知のとき、コンクリート圧縮縁応力と引張鉄筋応力が同時に許容応力となる条件を満足する最外圧縮鉄筋量 A'_s と最外引張鉄筋量 A_s は、式(43)、(44)および式(41)に式(39)を代入することで求めることができる。

6. 応力度算定式の解析解

本マクロを用いた応力度計算の検証のため、RC断面計算の解析解との比較を実施した（後述）。解析解については、土木学会・コンクリート標準示方書解説・参考篇（1936年発行）に提示される解析式を使用した。以下に、T形および円形断面の応力度算定式の解析解を示す。

6.1 T形断面

複鉄筋T形RC断面に軸力と曲げが作用したとき、中立軸算定式の解析解は、次式で表される。

$$\frac{e}{h} = \frac{B}{A} \quad (45)$$

ここに、 e ：断面中心から曲げモーメント M を考慮した偏心軸力 N までの距離 ($e=M/N$)

h ：T形断面の全断面高さ

A, B ：中立軸位置と断面諸元によって定まり、以下の式で表される

$$A = k^2 - \left(1 - \frac{b_0}{b}\right) \left(k - \frac{t}{h}\right)^2 + 2np' \left(k - \frac{d'}{h}\right) - 2np \left(\frac{d}{h} - k\right) \quad (46)$$

$$B = \left(\frac{1}{2} - \frac{k}{3}\right) k^2 - \left(1 - \frac{b_0}{b}\right) \left(k - \frac{t}{h}\right)^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{k}{3} - \frac{2t}{3h}\right) + 2np' \left(k - \frac{d'}{h}\right) \left(\frac{1}{2} - \frac{d'}{h}\right) + 2np \left(\frac{d}{h} - k\right) \left(\frac{d}{h} - \frac{1}{2}\right) \quad (47)$$

ここに、 k ：中立軸比 ($=x/h$ 、 x ：圧縮縁から中立軸までの距離)、 n ：ヤング係数比 ($=15$)

b_0 ：ウェブ幅、 b ：フランジ幅、 t ：フランジ厚さ、 d' ：圧縮鉄筋被り

d ：引張鉄筋被り（圧縮縁から引張鉄筋までの距離）

p' ：圧縮鉄筋比 ($=As'/(bh)$ 、 As' ：圧縮鉄筋断面積)

p ：引張鉄筋比 ($=As/(bh)$ 、 As ：引張鉄筋断面積)

コンクリート応力度 σ_c および引張鉄筋応力度 σ_s は、次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{N\left(x - \frac{h}{2}\right) + M}{I_x} x \quad (48)$$

$$I_x = \frac{b_0(kh)^3}{3} + (b - b_0) \left\{ \frac{t^3}{12} + t \left(kh - \frac{t}{2} \right)^2 \right\} + nA_s'(kh - d')^2 + nA_s(d - kh)^2 \quad (49)$$

$$\sigma_s = \frac{n\sigma_c}{k} \left(\frac{d}{h} - k \right) \quad (50)$$

ここに、 σ_c ：コンクリート圧縮縁の応力（圧縮正）、 σ_s ：引張鉄筋の応力（引張正）

I_x ：中立軸周りの換算断面2次モーメント

M ：曲げモーメント（下縁側引張正）、 N ：軸力（圧縮正）

式(45)は、軸力 $N=0$ のとき、ゼロ割りが生じ適用不可となる。この条件での中立軸算定式は、 $A=0$ を用いればよい。また、偏心距離 e を断面中心からの距離で定義しているため、軸力作用位置を断面中心と仮定している。

解析解を用いた応力度算定では、式(45)を使用して中立軸位置 x を算出し、その x を式(48)～(50)に代入して応力度を求めた。式(45)は中立軸比 k に関する3次方程式となるので、エクセルマクロによる繰り返し計算により解を求めた。

なお、式(46)～(50)に示す解は、ウェブ幅 b_0 をフランジ幅 b に等値すれば ($b_0=b$)、矩形断面に対す

る解析解となる。

上記の式(45)～(50)は、中立軸が断面内にある場合の解であるが、中立軸が断面外になる場合（中立軸位置 x が $x>h$ ）には全断面圧縮状態となり、別途考慮する必要がある。

全断面圧縮状態に対しては、全断面有効仮定での応力度算定式を使用する。

T形断面に対する全断面有効仮定での応力度算定式は、以下の通りである。

$$\sigma_c = \frac{N}{A_g} + \frac{M}{I_g} y_c \quad (51)$$

$$\sigma_t = \frac{N}{A_g} - \frac{M}{I_g} y_t \quad (52)$$

$$\sigma_s' = -n \left\{ \sigma_c - \frac{d'}{h} (\sigma_c - \sigma_t) \right\} \quad (53)$$

$$\sigma_s = -n \left\{ \sigma_c - \frac{d}{h} (\sigma_c - \sigma_t) \right\} \quad (54)$$

$$A_g = bt + b_0(h - t) + n(A_s' + A_s) \quad (55)$$

$$I_g = \frac{1}{3} \{ b y_c^3 - (b - b_0)(y_c - t)^3 + b_0 y_t^3 \} + n \{ A_s' (d - y_c)^2 + A_s (y_c - d')^2 \} \quad (56)$$

$$y_c = \frac{\frac{1}{2} b t^2 + \frac{1}{2} b_0 (h^2 - t^2) + n(A_s' d' + A_s d)}{bt + b_0(h - t) + n(A_s' + A_s)} \quad (57)$$

$$y_t = h - y_c \quad (58)$$

ここに、 σ_c : 圧縮縁のコンクリート応力（圧縮正）

σ_t : 引張縁のコンクリート応力（圧縮正）

σ_s' : 圧縮鉄筋応力（引張正）

σ_s : 引張鉄筋応力（引張正）

A_g : 換算断面積

I_g : 断面図心周りの換算断面 2 次モーメント

y_c : 圧縮縁から断面図心までの距離

y_t : 引張縁から断面図心までの距離

N : 断面図心に作用する作用軸力（圧縮正）

M : 作用曲げモーメント

上記の式(51)～(58)は、断面図心位置に軸力が作用する条件で成立する。したがって、断面中心に軸力が作用する場合には、次式で表される付加モーメント M_A を作用曲げモーメントに加算する必要がある。

$$M_A = N \left(y_c - \frac{h}{2} \right) \quad (59)$$

また、式(51)～(58)において、 $b_0=b$ とすることにより、矩形断面における全断面圧縮状態の応力度計算に適用可能である。

なお、全断面引張状態（中立軸位置 x が $x<0$ ）に対しては、式(51)～(58)において、コンクリートの抵抗を無視し、 $b=0$ および $b_0=0$ として発生応力度を算出する。

6.2 円形断面

円形 RC 断面（周方向 1 段配筋）に軸力と曲げが作用したとき、中立軸算定式の解析解は、次式で表される。

$$\frac{e}{r} = \frac{B}{A} \quad (60)$$

ここに、 e ：断面中心から曲げモーメント M を考慮した偏心軸力 N までの距離 ($e=M/N$)

r ：円形断面の半径

A, B ：中立軸位置と断面諸元によって定まり、以下の式で表される

$$A = \frac{\sin\varphi}{3} (3 + \cos^2\varphi) - \varphi \cos\varphi - n\pi r \cos\varphi \quad (61)$$

$$B = \frac{\varphi}{4} - \sin\varphi \cos\varphi \left(\frac{5}{12} - \frac{1}{6} \cos^2\varphi \right) + \frac{1}{2} n\pi r \left(\frac{r'}{r} \right)^2 \quad (62)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{r-x}{r} \quad (63)$$

ここに、 φ ：コンクリート圧縮域の中心角の 1/2（図 4.2-1 の θ と定義が異なる、 $\varphi = \theta / 2$ ）

r' ：鉄筋位置の半径

n ：ヤング係数比（=15）

p ：鉄筋比（ $=A_s/(\pi r^2)$ 、 A_s ：全鉄筋断面積）

コンクリート応力度 σ_c および引張鉄筋応力度 σ_s は、次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{N(x-\frac{h}{2})+M}{I_x} x \quad (64)$$

$$I_x = r^4 \left\{ \varphi \left(\frac{1}{4} + \cos^2\varphi \right) - \sin\varphi \cos\varphi \left(\frac{13}{12} + \frac{1}{6} \cos^2\varphi \right) \right\} + n\pi r^4 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{r'}{r} \right)^2 + \cos^2\varphi \right\} \quad (65)$$

$$\sigma_s = \frac{x-r-r'}{x} n\sigma_c \quad (66)$$

ここに、 σ_c ：コンクリート圧縮縁の応力（圧縮正）

σ_s ：引張鉄筋の応力（引張正）

I_x ：中立軸周りの換算断面 2 次モーメント

M ：曲げモーメント、 N ：軸力（圧縮正）

式(60)は、軸力 $N=0$ のとき、ゼロ割りが生じ適用不可となる。この条件での中立軸算定式は、 $A=0$ を用いればよい。解析解を用いた応力度算定では、式(60)を使用して中立軸位置 x を算出し、その x を式(64)～(66)に代入して応力度を求めた。式(60)は中立軸位置 x の三角関数を含む方程式となるので、エクセルマクロによる繰り返し計算により解を求めた。

上記の式(60)～(66)は、中立軸が断面内にある場合の解であるが、中立軸が断面外になる（中立軸位置 x が $x>2r$ ）場合には全断面圧縮状態となり、別途考慮する必要がある。

全断面圧縮状態の場合には、全断面有効仮定での応力度算定式を使用する。

円形断面に対する全断面有効仮定での応力度算定式は、以下の通りである。

$$\sigma_c = \frac{N}{A_g} + \frac{M}{I_g} r \quad (67)$$

$$\sigma_t = \frac{N}{A_g} - \frac{M}{I_g} r \quad (68)$$

$$\sigma'_s = -n \left\{ \sigma_c - \frac{r-r'}{2r} (\sigma_c - \sigma_t) \right\} \quad (69)$$

$$\sigma_s = -n \left\{ \sigma_c - \frac{r+r'}{2r} (\sigma_c - \sigma_t) \right\} \quad (70)$$

$$A_g = \pi r^2 + nA_s \quad (71)$$

$$I_g = \frac{\pi}{4} r^4 + \frac{nA_s}{2} r'^2 \quad (72)$$

ここに、 σ_c : 圧縮縁のコンクリート応力 (圧縮正)

σ_t : 引張縁のコンクリート応力 (圧縮正)

σ'_s : 最外圧縮鉄筋応力 (引張正)

σ_s : 最外引張鉄筋応力 (引張正)

A_g : 換算断面積

I_g : 断面中心周りの換算断面 2 次モーメント

N : 断面中心に作用する作用軸力 (圧縮正)

M : 作用曲げモーメント

なお、全断面引張状態 (中立軸位置 x が $x < 0$) に対しては、式(71)および(72)において、換算断面積と換算断面 2 次モーメントのコンクリート寄与分をゼロとして発生応力度を算出する。

7. マクロにおける計算手順

マクロにおける応力度算出の計算手順を、以下に示す。

(1) 入力データ 1 の読み込み

シート「入力データ 1」に入力した以下のデータを読み込む。

mf_inp(icase) : ケース番号 **icase** の曲げモーメント (kNm)
nf_inp(icase) : ケース番号 **icase** の軸力 (kN)
sect(icase) : ケース番号 **icase** の断面形状 (矩形 or 円形 or T 形)
ipr(icase) : ケース番号 **icase** の断面諸元番号
ical(icase) : ケース番号 **icase** の計算種類
ref(icase) : ケース番号 **icase** の説明欄
kk1, kk2 : 中立軸探索範囲を設定するパラメータ ($kk1 \cdot h < x < kk2 \cdot h$ の範囲で探索を行う)
iflag1 : 軸力作用位置のオプションパラメータ
iflag2 : シート「チェック用」への書き出しのオプションパラメータ
ncase : 全計算ケース数

(2) 計算ケース数 ncase 分の繰り返しの開始

(1) で入力した計算ケース数 (**ncase**) の繰り返しを開始する。

(3)-1 入力データ 2(矩形)の読み込み

sect(icase) が「矩形」のとき、シート「入力データ 2(矩形)」に入力した以下のデータを読み込む。

ipr_inp(i) : 番号 **i** の断面諸元番号
h_inp(i) : 番号 **i** の断面高さ (全高) (cm)
b_inp(i) : 番号 **i** の断面幅 (cm)
sca_inp(i) : 番号 **i** のコンクリート許容応力度 (N/mm²)
ssa_inp(i) : 番号 **i** の鉄筋許容応力度 (N/mm²)
ndan_inp(i) : 番号 **i** の総鉄筋段数
cv_inp(i,j) : 番号 **i** の **j** 段目鉄筋の被り (cm) (圧縮縁からの距離)
ast_inp(i,j) : 番号 **i** の **j** 段目鉄筋の鉄筋量 (cm²)

上記の鉄筋被りおよび鉄筋量の入力については、最外圧縮鉄筋を 1 段目とし、最外引張鉄筋を **ndan** 段目とする。

(3)-2 諸元の設定 (矩形)

計算ケースの断面諸元番号に相当する諸元データを、入力データ 2(矩形)のデータから抽出し、以下のデータを設定する。なお、諸元が見つからないときには、メッセージを出力して次の計算ケースにスキップする。

h : 断面高さ (cm)
b : 断面幅 (cm)
sca : コンクリート許容応力度 (N/mm²)

ssa : 鉄筋許容応力度 (N/mm²)
ndan : 全鉄筋段数
cv(i),i=1 to ndan : i 段目の鉄筋被り (cm) (圧縮縁からの距離)
ast(i),i=1 to ndan : i 段目の鉄筋量 (cm²)

(4)-1 入力データ 2(円形)の読み込み

sect(icase)が「円形」のとき、シート「入力データ 2(円形)」に入力した以下のデータを読み込む。

ipr_inp(i) : 番号 i の断面諸元番号
rc_inp(i) : 番号 i の断面半径 (cm)
sca_inp(i) : 番号 i のコンクリート許容応力度 (N/mm²)
ssa_inp(i) : 番号 i の鉄筋許容応力度 (N/mm²)
ndan_inp(i) : 番号 i の総鉄筋段数
rs_inp(i,j) : 番号 i の j 段目鉄筋位置の半径 (cm) (円中心からの距離)
ast_inp(i,j) : 番号 i の j 段目鉄筋の鉄筋量 (cm²)

上記の鉄筋位置の半径および鉄筋量の入力については、最外周の鉄筋を 1 段目、最内周の鉄筋を ndan 段目とする。また、鉄筋量は 1 周あたりの鉄筋断面積の総和を入力する。

(4)-2 諸元の設定 (円形)

rc : 断面半径 (cm)
sca : コンクリート許容応力度 (N/mm²)
ssa : 鉄筋許容応力度 (N/mm²)
ndan : 全鉄筋段数
rs(i),i=1 to ndan : i 段目の鉄筋位置の半径 (cm)
ast(i) : i=1 to ndan : i 段目の鉄筋量 (cm²)

(5)-1 入力データ 2(T形)の読み込み

sect(icase)が「T形」のとき、シート「入力データ 2(T形)」に入力した以下のデータを読み込む。

ipr_inp(i) : 番号 i の断面諸元番号
h_inp(i) : 番号 i の断面高さ (全高) (cm)
b_inp(i) : 番号 i のフランジ幅 (cm)
t_inp(i) : 番号 i のフランジ厚 (cm)
bw_inp(i) : 番号 i のウェブ幅 (cm)
sca_inp(i) : 番号 i のコンクリート許容応力度 (N/mm²)
ssa_inp(i) : 番号 i の鉄筋許容応力度 (N/mm²)
ndan_inp(i) : 番号 i の総鉄筋段数
cv_inp(i,j) : 番号 i の j 段目鉄筋の被り (cm) (圧縮縁からの距離)
ast_inp(i,j) : 番号 i の j 段目鉄筋の鉄筋量 (cm²)

上記の鉄筋被りおよび鉄筋量の入力については、最外圧縮鉄筋を 1 段目とし、最外引張鉄筋を ndan

段目とする。

(5)-2 諸元の設定 (T形)

計算ケースの断面諸元番号に相当する諸元データを、入力データ 2(T形)のデータから抽出し、以下のデータを設定する。なお、諸元が見つからないときには、メッセージを出力して次の計算ケースにスキップする。

h : 断面高さ (cm)

b : フランジ幅 (cm)

t : フランジ厚 (cm)

bw : ウェブ厚 (cm)

sca : コンクリート許容応力度 (N/mm²)

ssa : 鉄筋許容応力度 (N/mm²)

ndan : 全鉄筋段数

cv(i), i=1 to ndan : i 段目の鉄筋被り (cm) (圧縮縁からの距離)

ast(i), i=1 to ndan : i 段目の鉄筋量 (cm²)

(6)ndan、sca、ssa および h をケースごとに、以下の変数にストア

ndan_st(icase) : ケース番号 icase の鉄筋段数

sca_st(icase) : ケース番号 icase のコンクリート許容応力度

ssa_st(icase) : ケース番号 icase の鉄筋許容応力度

h2_st(icase) : ケース番号 icase の断面高さ

(7)曲げモーメントと軸力を定義し、単位変換を行う

mf : 曲げモーメント (ただし、Abs(mf_inp(icase))) : 正值とし単位を kNcm に変換)

nf : 軸力 (単位 : kN)

(8)負曲げ時、鉄筋被りおよび断面寸法の変更

矩形断面あるいは T 形断面でかつ曲げモーメントが負のとき、鉄筋被りおよび鉄筋量を、圧縮縁側と引張縁側で逆転させる。すなわち、鉄筋被り cv(i)を h-cv(ndan-i+1)に、鉄筋量 ast(i)を ast(ndan-i+1)に変更する。また、T 形断面で曲げモーメントが負のとき、b をウェブ幅 (bw) に、t をウェブ長さ (h-t) に、bw をフランジ幅 (b) に置き換える。なお、円形断面では上記の変更は行わない。

(9)引張鉄筋量を算出するための繰り返し計算の開始

計算種類 (ical(icase)) が 1 のとき、引張鉄筋量を算出するための繰り返し計算を、jcmx2 (デフォルト値 100) 回繰り返す。計算種類が 0 あるいは 2 のときは、繰り返し計算は行わない。

(10)軸力作用位置 yc の計算

iflag1=1 のとき (デフォルト値 iflag1=1)、軸力作用位置を断面中心とし、yc=h/2 とする (矩形あるいは T 形)。iflag1 が 1 でないとき、yc を断面図心位置 (圧縮縁からの距離) とする。

矩形断面あるいは T 形断面の断面図心位置は、コンクリート断面積と鉄筋の換算断面積により、断面

積と腕の長さを乗じ断面積で除することにより算出する。ここに、鉄筋の換算断面積は、鉄筋断面積を n 倍 (n : ヤング係数比、 $=15$) して求める。円形断面については、 $yc=rc$ とする。

(11)計算種類が 2 のとき、圧縮および引張鉄筋断面積の計算 (矩形あるいは T 形断面)

計算種類 ($ical(icase)$) が 2 のとき、コンクリート圧縮縁および最外引張鉄筋が許容応力に達する条件により、最外圧縮鉄筋と最外引張鉄筋の断面積を算出する。このとき、 $yc=h/2$ を仮定する。

式(39)により中立軸位置を求め、式(44)に代入して最外圧縮鉄筋量を、また式(41)に代入して最外引張鉄筋量を算出する。

また、計算ケースごとに、最外引張鉄筋量と最外圧縮鉄筋量を、以下の変数にストアする。

$ast_許容(icase)$: ケース番号 $icase$ の最外引張鉄筋量

$ast_許容 2(icase)$: ケース番号 $icase$ の最外圧縮鉄筋量

計算種類が 2 のとき、中立軸の繰り返し計算は行わず、応力度の計算にスキップする。

また、円形断面で $ical(icase)=2$ を指定した場合、圧縮および引張鉄筋量の計算は行わず、メッセージを出力し、次の計算ケースにスキップする。

(12) x の初期値に対する $f(x)$ の計算

x の 2 つの値 $x1 (=kk1*h)$ および $x2 (=kk2*h)$ に対し、中立軸算定式 $f(x)=0$ の左辺値 $f(x1)$ および $f(x2)$ を計算する。ここに、 $f(x1)$ と $f(x2)$ の値は、式(11)により計算する。なお、円形断面に対しては、 $x1=kk1*(2*rc)$ および $x2=kk2*(2*rc)$ とする。

(13) $f(x1)$ と $f(x2)$ の符号を判定

$f(x1)$ と $f(x2)$ の符号が異なるとき、 $x1 < x < x2$ に解があると判断し ($x1 < x < x2$ において $f(x)$ の符号変化を仮定)、2 分法に移行する。 $f(x1)$ と $f(x2)$ の符号が同じとき、 $x=999$ とし、次の計算ケースにスキップする。

(14)2 分法による x の繰り返し計算の開始

$x2$ を「現在の x 」、 $x1$ を「一つ前の x 」および $f(x1)$ を「一つ前の sx 」として、2 分法によって、中立軸位置の算出を行う。

【2 分法について】

中立軸位置 x を求めるために 2 分法を用いているが、これは陽に解が求まらない方程式 $f(x)=0$ を数値的に解くための繰り返し計算の方法である。本解析では、 $f(x)$ が式(11)の左辺に対応している。

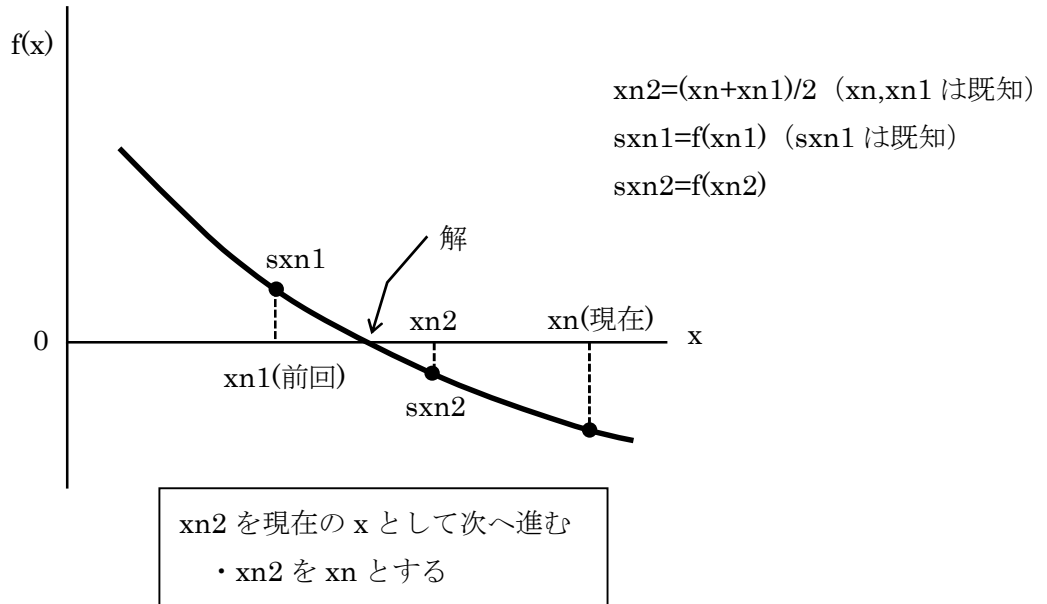
現在の $x (=xn)$ を $x2$ 、一つ前の $x (=xn1)$ を $x1$ として、その間に解が存在するものとしている。

2 分法は、 $xn1$ と xn の間で、より正確な x を算出するための繰り返し計算に適用される。

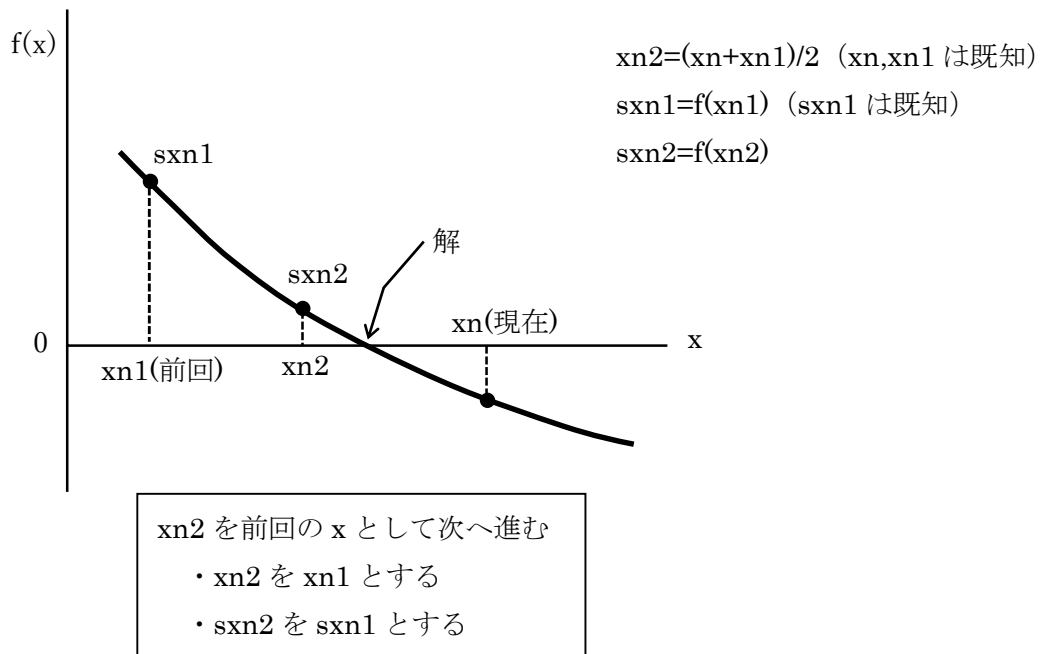
図 7-1 に、2 分法の考え方を示す。

2 分法による繰り返し計算の出発時点において、図 7-1 の $xn1$ (1 つ前の x の値)、 xn (現在の x の値) および $sxn1$ (1 つ前の $f(x)$ の値) は、既知であることを前提とする。

2分法においては、許容誤差に達したときに収束と判断し、繰り返し計算のループから抜けるが、繰り返し回数が50回に達した場合にも繰り返し計算のループから抜けることとしている。これは、現況条件での計算において20~30回程程度で計算が収束していることから、デフォルト値を50回と設定したものである。



(a) $xn1$ と xn の midpoint の $f(x)$ の符号が反転した場合
($xn1$ と $xn2$ の間に解がある場合)



(b) $xn1$ と xn の midpoint の $f(x)$ の符号が反転しない場合
($xn2$ と xn の間に解がある場合)

図 7-1 2分法の考え方

2分法の求解の具体的手順は、以下の通りである。

- ① x_{n1} と x_n の中点の値 $x_{n2}=(x_{n1}+x_n)/2$ を求める。
- ② x_{n2} に対する $f(x)$ の値 s_{xn2} と x_{n1} に対する $f(x)$ の値 s_{xn1} の符号を比較し、符号が反転した場合 x_{n1} と x_{n2} の間に解があるとし、 x_{n2} を x_n として、①に戻り同様の計算を進める。 $(x_{n2}$ を現在の x と考える)
- ③ x_{n2} に対する $f(x)$ の値 s_{xn2} と x_{n1} に対する $f(x)$ の値 s_{xn1} の符号を比較し、符号が反転しない場合 x_{n2} と x_n の間に解があるとし、 x_{n2} を x_{n1} 、 s_{xn2} を s_{xn1} として、①に戻り同様の計算を進める。 $(x_{n2}$ を一つ前の x と考える)
- ④ $Abs((x_n-x_{n1})/x_n)$ の値が十分に小さくなったとき(本マクロでは 10^{-5})、解を $x=(x_{n1}+x_n)/2$ で求める。

(15)計算ケースごとに中立軸位置 x のストア

計算ケースごとに、中立軸位置 x を、以下の変数にストアする。

$xx(icase)$: ケース番号 $icase$ の中立軸位置 x (単位 : cm)

(16)換算断面 2 次モーメント I_x の計算

中立軸位置 x を用い、換算断面 2 次モーメントを、矩形断面に対し式(13)、円形断面に対し式(23)および T 形断面に対し式(36)により求める。

ixc : I_x へのコンクリート分に寄与

ixs : I_x への鉄筋分の寄与

ix : 換算断面 2 次モーメント I_x

(17)応力度の計算

コンクリート応力および鉄筋応力を、それぞれ式(37)および(38)により算出する。

$sigc(icase)$: ケース番号 $icase$ のコンクリート圧縮縁応力

(矩形断面かつ $x < 0$ のとき、全断面有効でのコンクリート引張縁応力に置き換えられる)

矩形および T 形断面 $sig_s(icase,j)$: ケース番号 $icase$ 、第 j 段目の鉄筋応力

円形断面 $sig_円形 t(icase,j)$: ケース番号 $icase$ 、第 j 段目の引張側の最外鉄筋応力

$sig_円形 c(icase,j)$: ケース番号 $icase$ 、第 j 段目の圧縮側の最外鉄筋応力

(18)照査値の計算

コンクリートおよび鉄筋の照査値を計算する。

$r_{tc}(icase)$: ケース番号 $icase$ のコンクリートの照査値 (コンクリート応力の σ_{ca} に対する比)

$r_{ts}(icase)$: ケース番号 $icase$ の最外引張鉄筋の照査値 (最外引張鉄筋応力の σ_{sa} に対する比)

(19)計算種類が 1 のとき、引張鉄筋量の更新を実施

計算種類が1のとき ($ical(icase)=1$)、最外引張鉄筋の発生応力と許容応力度を比較し、両者の値が異なるときには、引張鉄筋量を更新し、次のステップに移動する。

許容応力度に達する引張鉄筋量は、当初 ($it=1$) の鉄筋量の $1/100$ (最小値) あるいは 100 倍 (最大値) の範囲内にあると仮定し、現在の鉄筋量と鉄筋量最小値の平均、あるいは現在の鉄筋量と鉄筋量最大値の平均に、引張鉄筋量の更新を行う。このとき、鉄筋量最大・最小値についても、発生応力と許容応力の大小関係に応じて更新を行う。また、誤差判定条件は、発生応力度と許容応力度の差を許容応力度で除した値が 10^{-4} 以内とする。

最外引張鉄筋量の更新の後は、(9)に戻る。

(20)引張鉄筋量の繰り返し計算の繰り返し数のストア

最外引張鉄筋量の繰り返し計算の回数を、計算ケースごとにストアする。計算種類が1以外のときは、1となる。

$it_st(icase)$: ケース番号 $icase$ の引張鉄筋量繰り返し計算の回数

(21)チェック用書き出し

$iflag2=1$ のとき、中立軸算定式の左辺 $f(x)$ の値を、シート「チェック用」に書き出す (計算種類2のときは書き出さない)。

$kk1 \cdot h$ から $kk2 \cdot h$ の間を 1000 等分した x に対し、 $f(x)$ の値を書き出す。円形断面に対しては、 $kk1 \cdot (2 \cdot rc)$ から $kk2 \cdot (2 \cdot rc)$ の間を 1000 等分する。

(22)計算ケースの終了

1つの計算ケースが終了したのち、(2)に戻る。

(23)中立軸位置 x の収束状況の書き出し

計算ケースごとに、中立軸位置算出時の繰り返し回数と中立軸位置の収束状況を、シート「中立軸計算」に書き出す。

$nrep$: 中立軸計算が収束に至った繰り返し回数

$xj(icase,jc)$: ケース番号 $icase$ 、 jc 回の繰り返しにおける中立軸位置 x の値

(24)応力度の書き出し

応力度などの計算結果を、シート「応力度」に書き出す。

出力するデータを、以下に示す。

- ① ケース番号
- ② 説明欄
- ③ 計算種類
- ④ 断面諸元番号
- ⑤ $mf(kNm)$: 曲げモーメント
- ⑥ $nf(kN)$: 軸力
- ⑦ $x(cm)$: 中立軸位置 (圧縮縁からの距離)
- ⑧ $\sigma_c(N/mm^2)$: コンクリート圧縮縁の応力 (矩形断面かつ $x < 0$ のとき、全断面有効でのコンクリ

ート引張縁の応力)

- ⑨ σ_s (N/mm²) : 最外引張鉄筋の応力
- ⑩ σ_s' (N/mm²) : 最外圧縮鉄筋の応力
- ⑪ σ_{ca} (N/mm²) : コンクリート圧縮許容応力度
- ⑫ σ_{sa} (N/mm²) : 鉄筋引張許容応力度
- ⑬ 照査値(σ_c / σ_{ca}) : コンクリート応力の許容応力度の比
- ⑭ 照査値(σ_s / σ_{sa}) : 鉄筋応力の許容応力度の比
- ⑮ 判定(σ_c) : コンクリート応力の判定を「OK」あるいは「NG」で示す
- ⑯ 判定(σ_s) : 鉄筋応力の判定を「OK」あるいは「NG」で示す
- ⑰ 最外引張鉄筋量(cm²) : 計算種類 1 あるいは 2 のとき、計算された引張鉄筋量を示す
- ⑱ 最外圧縮鉄筋量(cm²) : 計算種類 2 のとき、計算された圧縮鉄筋量を示す
- ⑲ 繰り返し数 it : 計算種類 1 のとき、引張鉄筋量計算の繰り返し数
- ⑳ σ_{c1} (N/mm²) : 矩形断面かつ $x < 0$ のとき、全断面有効でのコンクリート圧縮縁の応力

8. 試算例（解析解および市販ソフトとの比較）

8.1 矩形断面

(1) 断面諸元および計算ケース

矩形断面に対し、表 8.1-1 の断面諸元を設定した。また、表 8.1-2 に示す通り、断面力を変更した 5 つの計算ケースを考慮した。

表 8.1-1 断面諸元（矩形断面）

項目	設定値
断面高さ h(cm)	40
断面幅 b(cm)	100
圧縮鉄筋量 A_{s2} (cm ²)	11.46
引張鉄筋量 A_{s1} (cm ²)	11.46
圧縮鉄筋被り d2(cm)	12
有効高 d1(cm)	28
コンクリート許容応力度(N/mm ²)	8
鉄筋許容応力度(N/mm ²)	160

表 8.1-2 計算ケース（矩形断面）

ケース番号	曲げモーメント (kNm)	軸力 (kN)	備考
1	34.1	69.3	圧縮軸力・正曲げ
2	-24.5	101.0	圧縮軸力・負曲げ
3	22.9	-82.4	引張軸力・正曲げ
4	8.5	198.5	全断面圧縮
5	-1.9	-103.1	全断面引張

(2) 計算結果

表 8.1-3 および 8.1-4 に、応力度計算結果を示す。同表には、本マクロによる結果とともに、解析解および市販ソフト（フォーラムエイト「ES」）による結果を併記している。

同表によれば、本マクロ、解析解および市販ソフトによる結果は、良い一致を示すことがわかる。

表 8.1-3 計算結果（矩形、マクロ vs 解析解）

ケース番号	M (kNm)	N (kN)	本マクロ			解析解			比 (x)	比 (σ_c)	比 (σ_s)	備考
			x (cm)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	x (cm)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)				
1	34.1	69.3	10.542	3.167	78.669	10.542	3.167	78.669	1.000	1.000	1.000	圧縮軸力/正曲げ
2	-24.5	101.0	13.355	2.034	33.461	13.355	2.034	33.462	1.000	1.000	1.000	圧縮軸力/負曲げ
3	22.9	-82.4	6.774	2.478	116.457	6.774	2.478	116.457	1.000	1.000	1.000	引張軸力/正曲げ
4	8.5	198.5	49.885	0.763	-5.021	-	0.763	-	-	1.000	-	全断面圧縮
5	-1.9	-103.1	-15.015	-0.305	55.249	-	-	55.249	-	-	1.000	全断面引張

表 8.1-4 計算結果（矩形、マクロ vs 市販ソフト）

ケース番号	M (kNm)	N (kN)	本マクロ		市販ソフト		比 (σ_c)	比 (σ_s)	備考
			σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)			
1	34.1	69.3	3.167	78.669	3.167	78.670	1.000	1.000	圧縮軸力/正曲げ
2	-24.5	101.0	2.034	33.461	2.034	33.463	1.000	1.000	圧縮軸力/負曲げ
3	22.9	-82.4	2.478	116.457	2.478	116.455	1.000	1.000	引張軸力/正曲げ
4	8.5	198.5	0.763	—	0.763	0.000	1.000	—	全断面圧縮
5	-1.9	-103.1	—	55.249	0.000	55.249	—	1.000	全断面引張

(注) M：曲げモーメント、N：軸力(圧縮正)、x：圧縮縁から中立軸までの距離、 σ_c ：コンクリート圧縮縁の応力(圧縮正)、 σ_s ：引張鉄筋応力(引張正)

8.2 円形断面

(1) 断面諸元および計算ケース

円形断面に対し、表 8.2-1 の断面諸元を設定した。また、表 8.2-2 に示す通り、断面力を変更した 5 つの計算ケースを考慮した。

表 8.2-1 断面諸元（円形断面）

項目	設定値
断面半径 r_c (cm)	100
鉄筋位置の半径 r_s (cm)	85
1 周あたりの総鉄筋量 A_s (cm ²)	154.84
コンクリート許容応力度(N/mm ²)	8
鉄筋許容応力度(N/mm ²)	180

表 8.2-2 計算ケース（円形断面）

ケース番号	曲げモーメント (kNm)	軸力 (kN)	備考
1	2000	1000	圧縮軸力・正曲げ
2	2000	2000	圧縮軸力・正曲げ
3	2000	3000	圧縮軸力・正曲げ
4	1000	5000	全断面圧縮
5	1000	-3000	全断面引張

(2) 計算結果

表 8.2-3 に、本マクロと解析解による応力度計算結果を示した。

同表によれば、本マクロと解析解の結果は、良い一致を示すことがわかる。

表 8.2-3 計算結果 (円形、マクロ vs 解析解)

ケース番号	M (kNm)	N (kN)	本マクロ			解析解			比 (x)	比 (σ_c)	比 (σ_s)	備考
			x (cm)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	x (cm)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)				
1	2000.0	1000.0	61.552	5.155	155.087	61.551	5.155	155.087	1.000	1.000	1.000	N=1000kN
2	2000.0	2000.0	80.000	4.625	91.062	80.000	4.625	91.061	1.000	1.000	1.000	N=2000kN
3	2000.0	3000.0	105.605	4.110	46.348	105.605	4.110	46.348	1.000	1.000	1.000	N=3000kN
4	1000.0	5000.0	228.829	2.632	-7.563	-	2.632	-	-	1.000	-	全断面圧縮
5	1000.0	-3000.0	-8.375	-0.998	345.708	-	-	345.708	-	-	1.000	全断面引張

(注) M: 曲げモーメント、N: 軸力(圧縮正)、x: 圧縮縁から中立軸までの距離、 σ_c : コンクリート圧縮縁の応力(圧縮正)、 σ_s : 最外引張鉄筋の応力(引張正)

8.3 T形断面

(1) 断面諸元および計算ケース

T形断面に対し、表 8.3-1 の断面諸元を設定した。また、表 8.3-2 に示す通り、断面力を変更した 8 つの計算ケースを考慮した。

表 8.3-1 断面諸元 (T形断面)

項目	設定値
断面高さ h(cm)	40
フランジ幅 b(cm)	100
フランジ厚さ t(cm)	15
ウェブ幅 bw(cm)	50
圧縮鉄筋量 As2(cm ²)	9.95
引張鉄筋量 As1(cm ²)	16.3
圧縮鉄筋被り d2(cm)	8
有効高 d1(cm)	32
コンクリート許容応力度(N/mm ²)	8
鉄筋許容応力度(N/mm ²)	180

表 8.3-2 計算ケース (T形断面)

ケース番号	曲げモーメント (kNm)	軸力 (kN)	備考
1	70	70	圧縮軸力・正曲げ
2	70	150	圧縮軸力・正曲げ
3	70	300	圧縮軸力・正曲げ
4	70	400	圧縮軸力・正曲げ
5	70	500	圧縮軸力・正曲げ
6	-70	150	圧縮軸力・負曲げ
7	70	1000	全断面圧縮
8	30	-400	全断面引張

(2) 計算結果

表 8.3-3 に、本マクロと解析解による応力度計算結果を示した。

同表によれば、本マクロと解析解の結果は、良い一致を示すことがわかる。

表 8.3-3 計算結果 (T 形、マクロ vs 解析解)

ケース番号	M (kNm)	N (kN)	本マクロ			解析解			比 (x)	比 (σ_c)	比 (σ_s)	備考
			x (cm)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	x (cm)	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)				
1	70.0	70.0	11.217	4.645	129.088	11.217	4.645	129.088	1.000	1.000	1.000	N=70kN
2	70.0	150.0	12.754	4.624	104.668	12.754	4.624	104.667	1.000	1.000	1.000	N=150kN
3	70.0	300.0	16.512	4.479	63.020	16.512	4.479	63.020	1.000	1.000	1.000	N=300kN
4	70.0	400.0	20.115	4.354	38.590	20.115	4.354	38.590	1.000	1.000	1.000	N=400kN
5	70.0	500.0	24.832	4.256	18.427	24.832	4.256	18.427	1.000	1.000	1.000	N=500kN
6	-70.0	150.0	12.819	7.934	178.072	12.819	7.934	178.073	1.000	1.000	1.000	負曲げ
7	70.0	1000.0	48.821	4.939	—	—	4.939	—	—	1.000	—	全断面圧縮
8	30.0	-400.0	-6.588	—	199.387	—	—	199.387	—	—	1.000	全断面引張

(注) M : 曲げモーメント、N : 軸力(圧縮正)、x : 圧縮縁から中立軸までの距離、 σ_c : コンクリート圧縮縁の応力(圧縮正)、 σ_s : 引張鉄筋応力(引張正)

【参考資料】

- (1) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2018 年 12 月
- (2) 土木学会 : コンクリート標準示書解説・参考篇 (1936 年発行)