

# 矩形 RC 断面の M-N 相互作用図の作成

日中構造研究所 松原勝己  
同上 朴 永軍

## 1. はじめに

矩形 RC 断面の曲げ耐力は、軸力の大きさにより異なるとともに、軸力の値により曲げ破壊のモードも異なることが知られている。一般に、ある軸力（釣合軸力）以下においては、軸力の増大とともに曲げ耐力（終局曲げモーメント）が増大するが、釣合軸力を超えると軸力の増大とともに曲げ耐力が減少する挙動を示す。また、釣合軸力以下では、鉄筋降伏後に終局に達するのに対し、釣合軸力を超えると鉄筋が降伏する前に終局に達することが示される。ここで、終局の定義は、矩形 RC 断面の圧縮縁において限界ひずみ（例えば 0.0035）に達した時としている。

上記の挙動に関し、縦軸を軸力  $N$  とし、横軸を終局曲げモーメント  $M_u$  として図示したものを、図 1-1 に示すが、この終局曲げモーメントと軸力の関係は M-N 相互作用図と呼ばれている。

図 1-1 に示すように、矩形 RC 断面の M-N 相互作用図は、軸力  $N$  の変化に対して終局曲げモーメント  $M_u$  が極大値を有する形状となる。図では曲げモーメントの正側のみを示しているが、圧縮側と引張側で対称配筋の場合には、左右対称の形状となる。釣合軸力  $N_b$  において、終局曲げモーメントは極大値をとり、 $N_b$  よりも軸力が小さくても大きくなっても終局曲げモーメントが小さくなる挙動を示す。また、先に述べたように、 $N_b$  よりも小さい軸力範囲では鉄筋降伏が先行し、 $N_b$  よりも大きい軸力範囲では圧壊（圧縮縁が限界ひずみに達する）が先行する破壊モードを示す。

なお、設計断面力 ( $M_d, N_d$ ) を M-N 相互作用図上にプロットしたとき、点 ( $M_d, N_d$ ) が  $M_u$ - $N$  曲線の内部にある場合には、RC 断面の曲げ破壊が生じず安全性が担保されることを意味する。

以下では、M-N 相互作用図を図示するエクセルマクロを作成したので、入出力データや計算手順について説明します。なお、エクセルマクロは自由に使用していただいて結構ですが、計算結果の妥当性判断は使用者に帰することとします。また、ソースコードも公開しています。

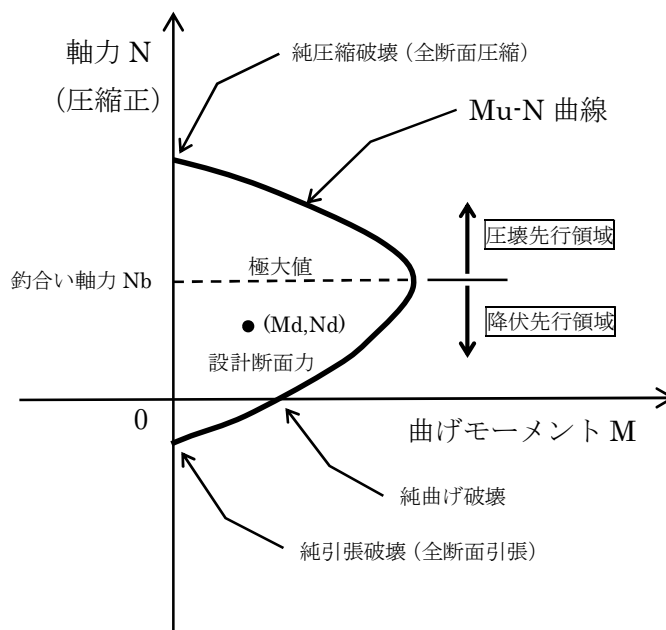


図 1-1 M-N 相互作用図

## 2. エクセルマクロの入出力データ

### 2.1 入力データ

エクセルマクロの入力データは、3つのシート「諸元入力」、「断面力入力」および「追加配筋データ」を用いて作成する。

- ・シート「諸元入力」:

断面寸法や材料定数、鉄筋量などの断面諸元を入力するシートである。

- ・シート「断面力入力」:

断面力照査を行う際に、設計曲げモーメントと設計軸力を入力するシートである。シート「断面力入力」には、適用する諸元データ番号も入力することで、設計断面力を適用する諸元値を選択する。

- ・シート「追加配筋データ」:

多段配筋を入力するためのシートである。複鉄筋の1段配筋の場合には、「諸元入力」に配筋データを入力するが、2段以上の配筋や側方鉄筋を考慮する場合に使用する。

以下では、上記3つのシートの入力パラメータの説明を行う。

#### (1)シート「諸元入力」

シート「諸元入力」に入力するパラメータを、以下に示す。

- ①諸元ケース
- ②分割数  $n_{div}$
- ③全高  $h$  (cm)
- ④幅  $b$  (cm)
- ⑤鉄筋ヤング係数  $e_s$  (kN/mm<sup>2</sup>)
- ⑥鉄筋降伏強度  $f_{y\_inp}$  (N/mm<sup>2</sup>)
- ⑦コンクリートヤング係数  $e_c$  (kN/mm<sup>2</sup>)
- ⑧コンクリート圧縮強度  $f_{c\_inp}$  (N/mm<sup>2</sup>)
- ⑨コンクリート引張強度  $f_t$  (N/mm<sup>2</sup>)
- ⑩鉄筋材料係数  $g_{ams}$
- ⑪コンクリート材料係数  $g_{amc}$
- ⑫部材係数  $g_{amb}$
- ⑬引張鉄筋断面積  $a_{s1}$  (cm<sup>2</sup>)
- ⑭引張鉄筋かぶり  $cv1$  (cm)
- ⑮圧縮鉄筋断面積  $a_{s2}$  (cm<sup>2</sup>)
- ⑯圧縮鉄筋かぶり  $cv2$  (cm)
- ⑰軸力の計算分割数  $n_{nd1}$

①の諸元ケースは、直接にデータとして使用しないが、データの存在の有無を確認するためのデータとして使用される。このデータが空欄あるいはゼロ値である場合、そこでデータ終了と認識し計算をス

トップする。

②の分割数は、分割法により耐力計算を行うために使用される断面高さ方向の分割数である。

⑩と⑪の鉄筋材料係数とコンクリート材料係数を入力することにより、 $f_y=fy\_inp/gams$ 、 $f_c=f_c\_inp/gamec$ として実際に用いる鉄筋降伏強度とコンクリート圧縮強度が設定される。ただし、材料係数を考慮しない場合でも 1.0 を入力する必要がある。

⑫の部材係数を入力することにより、照査時に使用される終局曲げモーメントが、 $gamb$  で除すことにより低減が考慮されることになる。また、表示される  $Mu-N$  曲線においても  $gamb$  の低減が考慮される。ただし、部材係数を考慮しない場合でも 1.0 を入力する必要がある。

⑰の軸力分割数は、 $M-N$  曲線を求めるときの軸力の数を設定するためのパラメータであり、最大軸力と最小軸力の間を  $nnd1$  等分した刻み間隔で  $M-N$  曲線が計算される。計算される軸力およびモーメントの数は、 $nnd1+1$  個となる。

なお、上記の①から⑰までの一連のデータは、複数の入力が可能である。その場合、複数の  $M-N$  曲線が算出されることになる。

エクセルマクロでのディメンジョン設定の関連から、以下の制限がある。以下の制限を変更する場合には、ソースコードのディメンジョンの大きさ ( $na1\sim na6$  の値) を変更する必要がある。

断面分割数 ( $na1$ ) : 最大 200

鉄筋段数 ( $na2$ ) : 最大 50

諸元ケース数 ( $na3$ ) : 最大 20

軸力分割数 ( $na4$ ) : 最大 300

中立軸位置計算の繰り返し計算回数 ( $na5$ ) : 最大 100

断面力ケース数 ( $na6$ ) : 最大 100

表 2.1-1 に、「諸元入力」のデータ例を示す。

表 2.1-1 シート「諸元入力」のデータ作成例

諸元 ケース (最大 20)	分割数 ndiv (最大 200)	全高 h (cm)	幅 b (cm)	鉄筋ヤ ング係 数 Es (kN/mm <sup>2</sup> )	鉄筋降 伏強 度 fy (N/mm <sup>2</sup> )	コンク リート ヤング 係数 Ec (kN/mm <sup>2</sup> )	コンク リート 圧縮強 度 fc (N/mm <sup>2</sup> )	コンク リート 引張強 度 ft (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋材 料係 数 γs	コンク リート 材料係 数 γc	部材係 数 γb	引張鉄 筋断 面積 as1 (cm <sup>2</sup> )	引張鉄 筋か ぶり cv1 (cm)	圧縮鉄 筋断 面積 as2 (cm <sup>2</sup> )	圧縮鉄 筋か ぶり cv2 (cm)	軸力の 計算分 割数 nnd1 (最大 300)
1	50	20	135	200	345	29.5	35	2.46	1.0	1.0	1.0	12.67	6	12.67	6	100
2	50	20	135	200	345	29.5	35	2.46	1.0	1.0	1.0	12.67	6	6.335	6	100

## (2)シート「断面力入力」

シート「断面力入力」のデータを、以下に示す。

①断面力ケース

②設計曲げモーメント  $fmd$  (kNm)

③設計軸力  $fnd$  (kN)

④選択する諸元ケース

①の断面力ケースは、直接にデータとして使用しないが、データの存在の有無を確認するためのデータとして使用される。このデータが空欄あるいはゼロ値である場合、そこでデータ終了と認識し計算をストップする。

②の設計曲げモーメントは、正および負の両方の値の入力が可能である。正および負の値はそれぞれ正曲げおよび負曲げを意味している。本マクロの正曲げの定義は、「諸元入力」で設定した引張鉄筋側に引張（圧縮鉄筋側に圧縮）が生じる曲げであり、一方負曲げの定義は「諸元入力」で設定した引張鉄筋側に圧縮（圧縮鉄筋側に引張）が生じる曲げである。また、正值の入力に対しては、正曲げに対応する  $My(+)-N$  関係および  $Mu(+)-N$  関係を用いて照査が行われ、負値の入力に対しては負曲げに対応する  $My(-)-N$  関係および  $Mu(-)-N$  関係を用いて照査が行われる。

③の設計軸力は、正および負の両方の値の入力が可能であり、圧縮を正（引張を負）として入力する。また、設計軸力の適用範囲を設定しており、断面諸元から決まる最大軸力と最小軸力の中に設計軸力の値がない場合には断面力照査をスキップする。

④の選択する諸元ケースは、断面力照査を実施する際に適用する諸元値を選択するためのデータである。この選択する諸元ケースの番号は、「諸元入力」データにおいて諸元ケースに対応している。断面力照査は、④で選択した諸元ケースで計算された  $M-N$  曲線により実施される。

表 2.1-2 に、「断面力入力」のデータ例を示す。

表 2.1-2 シート「断面力入力」のデータ作成例

断面力 ケース (最大100)	設計曲げ モーメント Md(kNm)	設計軸力 Nd(kN)	選択する諸元 ケース
1	130.0	1400.0	1
2	-130.0	1800.0	1
3	110.0	1400.0	2
4	-100.0	1700.0	2

### (3)シート「追加配筋データ」

シート「追加配筋データ」のデータを、以下に示す。

- ①ケース
- ②配筋段数
- ③鉄筋断面積 (cm<sup>2</sup>)
- ④引張縁からの距離 (cm)

①のケースは、「諸元入力」の諸元ケース番号に対応している。すなわち、追加配筋データのケース番号と同一の諸元ケース番号のデータをリンクさせるので、同一の順序で対応させておく必要がある。

②の配筋段数は、それぞれのケースで入力する配筋の段数である。

③の鉄筋断面積と④の引張縁からの距離は、両者を1組として②の配筋段数分を入力する必要がある。また、鉄筋位置の入力方法が「諸元入力」の鉄筋とは異なるので注意が必要である。（「諸元入力」ではコンクリート表面からの被り厚で入力）

また、「追加配筋データ」で鉄筋を入力した場合、「諸元入力」および「追加配筋データ」で指定した鉄筋の両方が考慮される。

さらに、「追加配筋データ」を考慮する場合には、ソースコードにおいて、パラメータ「isb」に1を設定する必要がある（現ソースコードは、isb=1としている）。

なお、「追加配筋データ」を考慮しない場合には、上記パラメータ「isb」を1以外の値とするか、あるいは「isb」を1に設定して②の配筋段数にゼロを入力する。

表 2.1-3 に、「追加配筋データ」のデータ例を示す。下記のデータの場合、配筋段数を0としているので、追加配筋データは考慮されない。

表 2.1-3 シート「追加配筋データ」のデータ例

ケース	配筋段数	鉄筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	引張縁からの距離 (cm)	(以下、鉄筋段数分 繰り返し)	
1	0	12.67	6	12.67	14
2	0	12.67	6	6.335	14

## 2.2 出力データ

エクセルマクロの出力データは、以下の 12 個のシートに出力される。

- ①照査結果
- ②照査結果 2
- ③My(+)-N 関係
- ④My(-)-N 関係
- ⑤Mu(+)-N 関係
- ⑥Mu(-)-N 関係
- ⑦Mc(+)-N 関係
- ⑧Mc(-)-N 関係
- ⑨断面分割データ
- ⑩中立軸計算 1
- ⑪中立軸計算 2
- ⑫中立軸計算 3

以下に、説明を加える。

### (1)シート「照査結果」

シート「照査結果」には、諸元ケース、断面力ケース、設計断面力、降伏耐力、降伏時照査値、終局耐力および終局時照査値の一覧が出力される。ここでは、M-N 曲線へ設計断面力をプロットする便宜のため、選択した諸元ケースごとにまとめて表示される。また、エクセル表計算による図を表示しており、M-N 曲線と対応する設計断面力がプロットされる。ただし、表示した図は諸元ケース分しか用意していないので、諸元ケースを増やした場合には、ユーザーが図をコピーするなどして M-N 図と設計断面力を再度プロットする必要がある。

終局曲げモーメントに対する照査では、N 一定の Mu (マクロでの変数 : mu) と M/N 一定の Mu (マクロでの変数 : mu2) の両者に関する照査が実施される。ここに、N 一定の Mu とは、設計断面力 Nd に対応する終局曲げモーメントである。一方 M/N 一定の Mu とは、M-N 軸平面上における設計断面力点 (Md,Nd) と原点を結んだ直線と Mu-N 曲線が交わる点の終局曲げモーメントである。これらの照査でどちらが安全側になるかは、設計断面力と Mu-N 曲線との兼ね合いで一概に言えないが、設計断面力の変動において Md が増大あるいは減少するときの Nd の変化に留意して照査方法を選ぶのが望ましいと考えられる。

降伏曲げモーメントおよび終局曲げモーメントともに、最大軸力と最小軸力間を等間隔に分割して算出しているので、設計断面力に対応する値は内挿を用いて算出される。

諸元入力で部材係数を設定した場合、終局曲げモーメントの算出時に、照査前の段階において部材係数で除して低減が考慮される。また、Mu-N 曲線の表示においても、部材係数の低減が考慮される。この部材係数の低減は降伏曲げモーメントには考慮されない。

表 2.2-1 に、シート「照査結果」の出力例を示す。

表 2.2-1 シート「照査結果」の出力例

諸元ケース	断面ケース	設計曲げモーメント (kNm)	設計軸力 (kN)	降伏曲げモーメント (kNm)	照査値 (Md/My)	判定(My)	終局曲げモーメント (kNm)・N一定	照査値 (Md/Mu)・N一定	判定(Mu)・N一定	終局曲げモーメント (kNm)・M/N一定	照査値 (Md/Mu)・M/N一定	判定(Mu)・M/N一定
1	1	130.0	1400.0	151.3	0.859	OK	158.4	0.821	OK	184.9	0.703	OK
1	2	-130.0	1800.0	172.5	0.754	OK	176.9	0.735	OK	215.5	0.603	OK
2	3	110.0	1400.0	152.7	0.720	OK	159.0	0.692	OK	207.8	0.529	OK
2	4	-100.0	1700.0	146.3	0.684	OK	152.7	0.655	OK	209.7	0.477	OK

諸元ケース1 (対称配筋)  
My-N

諸元ケース2 (非対称配筋)  
My-N

諸元ケース1 (対称配筋)  
Mu-N

諸元ケース2 (非対称配筋)  
Mu-N

(2)シート「照査結果 2」

シート「照査結果 2」はシート「照査結果」と類似の結果を出力するが、「照査結果 2」では設計軸力 Nd に対応する降伏あるいは終局曲げモーメントを、内挿を用いず直接に算出している。ただし、終局曲げモーメントに関しては、N一定の終局曲げモーメントのみの算出となる。

表 2.2-2 に、シート「照査結果 2」の出力例を示す。

表 2.2-2 シート「照査結果 2」の出力例

断面力ケース	選択した諸元ケース	設計曲げモーメント (kNm)	設計軸力 (kN)	降伏曲げモーメント (kNm)	照査値(降伏)	判定(降伏)	終局曲げモーメント (kNm)	照査値(終局)	判定(終局)
1	1	130	1400	151.5	0.858	OK	158.5	0.820	OK
2	1	-130	1800	172.5	0.754	OK	176.9	0.735	OK
3	2	110	1400	152.7	0.720	OK	159.0	0.692	OK
4	2	-100	1700	146.3	0.684	OK	152.7	0.655	OK

(3)シート「My(+)-N 関係」および「My(-)-N 関係」

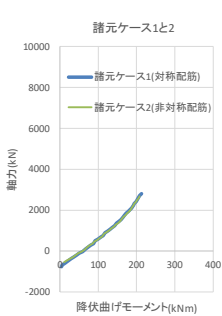
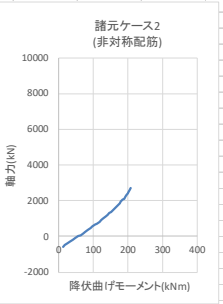
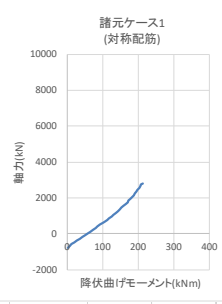
降伏曲げモーメントに関する M-N 曲線を出力するシートである。正曲げと負曲げに対して両者を別のシートに出力する。降伏曲げモーメントに関しては、デフォルトとして、降伏曲げモーメントが終局曲げモーメントを超えるような軸力、すなわち釣合い軸力以上の軸力においては My-N 関係を出力していない。

引張鉄筋および圧縮鉄筋の鉄筋量と被りが同一の対称配筋の場合、正側と負側の My-N 曲線は対称形となるが、非対称配筋にも対応可能とするため、正曲げと負曲げの両者を算出している。

表 2.2-3 に、シート「My(+)-N 関係」の出力例を示す。

表 2.2-3 シート「My(+)-N 関係」の出力例 (一部)

諸元ケース 1	番号	曲げモーメント(kNm)	軸力(kN)	中立軸位置 (cm)	圧縮鉄筋の降伏判定	諸元ケース 2	番号	曲げモーメント (kNm)	軸力(kN)	中立軸位置 (cm)	圧縮鉄筋の降伏判定
	1	-873.4	999.000		未降伏		1		-655.0	999.000	未降伏
	2	3.9	-217.44		未降伏		2	12.2	-562.2	-4.713	未降伏
	3	7.8	-679.4	-3.952	未降伏		3	18.6	-469.5	1.442	未降伏
	4	13.0	-582.5	1.059	未降伏		4	26.7	-376.7	2.238	未降伏
	5	20.9	-485.5	1.950	未降伏		5	34.5	-283.9	2.778	未降伏
	6	28.8	-388.6	2.590	未降伏		6	42.1	-191.1	3.229	未降伏
	7	36.5	-291.6	3.058	未降伏		7	49.6	-98.3	3.620	未降伏
	8	44.1	-194.6	3.463	未降伏		8	56.9	-5.6	3.969	未降伏
	9	51.6	-97.7	3.824	未降伏		9	64.2	87.2	4.286	未降伏
	10	59.0	-0.7	4.152	未降伏		10	71.4	180.0	4.581	未降伏
	11	66.0	96.2	4.414	未降伏		11	78.1	272.8	4.817	未降伏
	12	73.2	193.2	4.693	未降伏		12	85.0	365.6	5.074	未降伏
	13	80.0	290.1	4.926	未降伏		13	91.5	458.3	5.286	未降伏
	14	86.9	387.1	5.170	未降伏		14	98.2	551.1	5.514	未降伏
	15	93.8	484.1	5.404	未降伏		15	104.5	643.9	5.708	未降伏
	16	100.2	581.0	5.598	未降伏		16	111.0	736.7	5.918	未降伏
	17	106.6	678.0	5.790	未降伏		17	117.0	829.5	6.097	未降伏
	18	113.1	774.9	5.991	未降伏		18	123.4	922.2	6.295	未降伏
	19	119.2	871.9	6.171	未降伏		19	129.1	1015.0	6.461	未降伏
	20	125.6	968.9	6.362	未降伏		20	134.9	1107.8	6.627	未降伏
	21	131.5	1065.8	6.528	未降伏		21	140.8	1200.6	6.806	未降伏
	22	137.6	1162.8	6.711	未降伏		22	146.2	1293.4	6.962	未降伏
	23	143.2	1259.7	6.867	未降伏		23	151.9	1386.1	7.137	未降伏
	24	148.7	1356.7	7.022	未降伏		24	157.0	1478.9	7.286	未降伏
	25	154.4	1453.7	7.192	未降伏		25	162.0	1571.7	7.437	未降伏
	26	159.6	1550.6	7.340	未降伏		26	167.2	1664.5	7.605	未降伏
	27	165.0	1647.6	7.510	未降伏		27	171.8	1757.3	7.752	未降伏
	28	169.8	1744.5	7.653	未降伏		28	176.6	1850.0	7.923	未降伏
	29	174.4	1841.5	7.799	未降伏		29	180.7	1942.8	8.067	未降伏
	30	179.3	1938.4	7.964	未降伏		30	184.7	2035.6	8.214	未降伏
	31	183.5	2035.4	8.105	未降伏		31	188.9	2128.4	8.381	未降伏
	32	187.6	2132.4	8.249	未降伏		32	192.5	2221.2	8.524	未降伏
	33	191.8	2229.3	8.409	未降伏		33	196.0	2313.9	8.670	未降伏
	34	195.5	2326.3	8.548	未降伏		34	199.6	2406.7	8.833	未降伏
	35	199.1	2423.2	8.688	未降伏		35	202.7	2499.5	8.974	未降伏
	36	202.8	2520.2	8.843	未降伏		36	205.6	2592.3	9.118	未降伏
	37	206.1	2617.2	8.978	未降伏		37	208.7	2685.1	9.277	未降伏
	38	209.2	2714.1	9.114	未降伏		38		2777.8	9.416	未降伏
	39	212.4	2811.1	9.264	未降伏		39		2870.6	9.557	未降伏
	40		2908.0	9.394	未降伏		40		2963.4	9.711	未降伏
	41		3005.0	9.525	未降伏		41		3056.2	9.846	未降伏
	42		3102.0	9.669	未降伏		42		3149.0	9.984	未降伏
	43		3198.9	9.793	未降伏		43		3241.8	10.158	圧縮降伏
	44		3295.9	9.918	未降伏		44		3334.5	10.316	圧縮降伏
	45		3392.8	10.077	圧縮降伏		45		3427.3	10.497	圧縮降伏
	46		3489.8	10.239	圧縮降伏		46		3520.1	10.652	圧縮降伏
	47		3586.7	10.409	圧縮降伏		47		3612.9	10.814	圧縮降伏
	48		3683.7	10.591	圧縮降伏		48		3705.7	10.990	圧縮降伏
	49		3780.7	10.757	圧縮降伏		49		3798.4	11.148	圧縮降伏
	50		3877.6	10.944	圧縮降伏		50		3891.2	11.314	圧縮降伏





(4) シート「Mu(+)-N 関係」および「Mu(-)-N 関係」

終局曲げモーメントに関する M-N 曲線を出力するシートである。正曲げと負曲げに対して両者を別のシートに出力する。

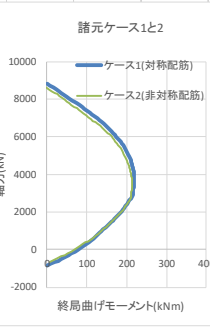
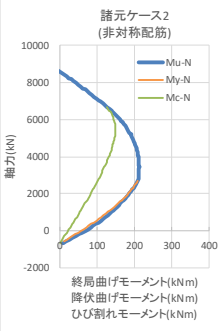
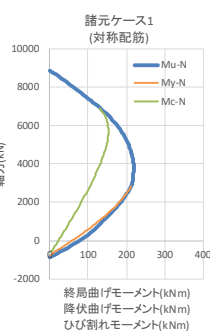
引張鉄筋および圧縮鉄筋の鉄筋量と被りが同一の対称配筋の場合、正側と負側の Mu-N 曲線は対称形となるが、非対称配筋にも対応可能とするため、正曲げと負曲げの両者を算出している。

「諸元入力」で部材係数を考慮した場合、Mu-N 曲線において、部材係数で除して低減が考慮される。

表 2.2-4 に、シート「Mu(+)-N 関係」の出力例を示す。

表 2.2-4 シート「Mu(+)-N 関係」の出力例 (一部)

諸元ケース1	番号	曲げモーメント(kNm)	軸力(kN)	中立軸位置(cm)	圧縮鉄筋の降伏判定	諸元ケース2	番号	曲げモーメント(kNm)	軸力(kN)	中立軸位置(cm)	圧縮鉄筋の降伏判定
	1	0.1	-873.4	0.002	引張降伏		1	8.5	-655.0	0.002	引張降伏
	2	9.7	-776.4	0.247	引張降伏		2	17.7	-562.2	0.236	引張降伏
	3	19.0	-679.4	0.581	引張降伏		3	26.7	-469.5	0.551	引張降伏
	4	28.1	-582.5	0.871	引張降伏		4	35.4	-376.7	0.829	引張降伏
	5	36.9	-485.5	1.172	引張降伏		5	44.0	-283.9	1.120	引張降伏
	6	45.5	-388.6	1.479	引張降伏		6	52.3	-191.1	1.413	引張降伏
	7	53.9	-291.6	1.779	引張降伏		7	60.4	-98.3	1.700	引張降伏
	8	62.0	-194.6	2.076	引張降伏		8	68.3	-5.6	1.985	引張降伏
	9	69.9	-97.7	2.377	引張降伏		9	76.0	87.2	2.273	引張降伏
	10	77.6	-0.7	2.687	引張降伏		10	83.4	180.0	2.561	引張降伏
	11	85.0	96.2	2.976	引張降伏		11	90.7	272.8	2.846	引張降伏
	12	92.1	193.2	3.275	引張降伏		12	97.7	365.6	3.135	引張降伏
	13	99.1	290.1	3.574	引張降伏		13	104.5	458.3	3.419	引張降伏
	14	105.8	387.1	3.880	引張降伏		14	111.0	551.1	3.704	引張降伏
	15	111.6	484.1	4.095	未降伏		15	117.4	643.9	3.990	引張降伏
	16	116.7	581.0	4.255	未降伏		16	122.8	736.7	4.205	未降伏
	17	121.8	678.0	4.408	未降伏		17	128.2	829.5	4.390	未降伏
	18	126.9	774.9	4.573	未降伏		18	133.4	922.2	4.606	未降伏
	19	131.9	871.9	4.744	未降伏		19	138.6	1015.0	4.801	未降伏
	20	137.0	968.9	4.918	未降伏		20	143.7	1107.8	5.024	未降伏
	21	141.9	1065.8	5.102	未降伏		21	148.6	1200.6	5.232	未降伏
	22	146.8	1162.8	5.285	未降伏		22	153.5	1293.4	5.460	未降伏
	23	151.6	1259.7	5.479	未降伏		23	158.3	1386.1	5.680	未降伏
	24	156.4	1356.7	5.671	未降伏		24	162.9	1478.9	5.912	未降伏
	25	161.0	1453.7	5.875	未降伏		25	167.5	1571.7	6.163	未降伏
	26	165.6	1550.6	6.082	未降伏		26	171.8	1664.5	6.386	未降伏
	27	170.1	1647.6	6.297	未降伏		27	176.1	1757.3	6.640	未降伏
	28	174.5	1744.5	6.536	未降伏		28	180.2	1850.0	6.903	未降伏
	29	178.6	1841.5	6.744	未降伏		29	184.0	1942.8	7.129	未降伏
	30	182.8	1938.4	6.983	未降伏		30	187.8	2035.6	7.390	未降伏
	31	186.7	2035.4	7.203	未降伏		31	191.4	2128.4	7.660	未降伏
	32	190.5	2132.4	7.443	未降伏		32	194.7	2221.2	7.888	未降伏
	33	194.3	2229.3	7.695	未降伏		33	197.9	2313.9	8.155	未降伏
	34	197.7	2326.3	7.915	未降伏		34	200.9	2406.7	8.397	未降伏
	35	201.1	2423.2	8.167	未降伏		35	203.8	2499.5	8.660	未降伏
	36	204.4	2520.2	8.429	未降伏		36	206.5	2592.3	8.932	未降伏
	37	207.2	2617.2	8.651	未降伏		37	208.8	2685.1	9.177	未降伏
	38	210.1	2714.1	8.912	未降伏		38	210.7	2777.8	9.426	未降伏
	39	212.6	2811.1	9.147	未降伏		39	211.3	2870.6	9.631	未降伏
	40	215.0	2908.0	9.399	未降伏		40	211.7	2963.4	9.808	未降伏
	41	215.7	3005.0	9.603	未降伏		41	212.1	3056.2	10.018	未降伏
	42	216.3	3102.0	9.777	未降伏		42	212.4	3149.0	10.199	未降伏
	43	216.9	3198.9	9.986	未降伏		43	212.7	3241.8	10.414	未降伏
	44	217.3	3295.9	10.164	未降伏		44	212.8	3334.5	10.599	未降伏
	45	217.7	3392.8	10.378	未降伏		45	212.9	3427.3	10.818	未降伏
	46	218.0	3489.8	10.561	未降伏		46	212.8	3520.1	11.008	未降伏
	47	218.3	3586.7	10.780	未降伏		47	212.8	3612.9	11.230	未降伏
	48	218.3	3683.7	10.968	未降伏		48	212.5	3705.7	11.424	未降伏
	49	218.5	3780.7	11.190	未降伏		49	212.3	3798.4	11.649	未降伏
	50	218.3	3877.6	11.383	未降伏		50	211.8	3891.2	11.850	圧縮降伏





(6)シート「断面分割データ」

断面分割を行った後の分割要素の断面積および要素中心の座標（引張縁からの距離）、鉄筋断面積および鉄筋位置座標（引張縁からの距離）の出力を行うシートである。

ここで、コンクリート分割要素の断面積は、ソースコード内のフラグ iflag3=1 のとき、鉄筋断面積を差し引いた面積としている。また、正曲げに対する断面分割データの出力のみとなる。ただし、図心位置については正曲げと負曲げの両方の出力としている。

表 2.2-6 に、シート「断面分割データ」の出力例を示す。

表 2.2-6 シート「断面分割データ」の出力例（一部）

1	番号	分割断面中心座標 (cm)引張縁からの距離	分割断面断面積 (cm <sup>2</sup> )コンクリートのみ	番号	鉄筋位置座標 (cm)引張縁からの距離	鉄筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	断面積 (cm <sup>2</sup> )	図心位置 (m)圧縮縁からの距離	2	番号	分割断面中心座標 (cm)引張縁からの距離	分割断面断面積 (cm <sup>2</sup> )コンクリートのみ	番号	鉄筋位置座標 (cm)引張縁からの距離	鉄筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	断面積 (cm <sup>2</sup> )	図心位置 (m)圧縮縁からの距離	
	1	0.200	54.000							1	0.200	54.000						
	2	0.600	54.000		1	6.000	12.670	2700.0		2	0.600	54.000		1	6.000	12.67	2700	0.100521
	3	1.000	54.000		2	14.000	12.670			3	1.000	54.000		2	14	6.335		0.099479
	4	1.400	54.000							4	1.400	54.000						
	5	1.800	54.000							5	1.800	54.000						
	6	2.200	54.000							6	2.200	54.000						
	7	2.600	54.000							7	2.600	54.000						
	8	3.000	54.000							8	3.000	54.000						
	9	3.400	54.000							9	3.400	54.000						
	10	3.800	54.000							10	3.800	54.000						
	11	4.200	54.000							11	4.200	54.000						
	12	4.600	54.000							12	4.600	54.000						
	13	5.000	54.000							13	5.000	54.000						
	14	5.400	54.000							14	5.400	54.000						
	15	5.800	47.665							15	5.800	47.665						
	16	6.200	47.665							16	6.200	47.665						
	17	6.600	54.000							17	6.600	54.000						
	18	7.000	54.000							18	7.000	54.000						
	19	7.400	54.000							19	7.400	54.000						
	20	7.800	54.000							20	7.800	54.000						
	21	8.200	54.000							21	8.200	54.000						
	22	8.600	54.000							22	8.600	54.000						
	23	9.000	54.000							23	9.000	54.000						
	24	9.400	54.000							24	9.400	54.000						
	25	9.800	54.000							25	9.800	54.000						
	26	10.200	54.000							26	10.200	54.000						
	27	10.600	54.000							27	10.600	54.000						
	28	11.000	54.000							28	11.000	54.000						
	29	11.400	54.000							29	11.400	54.000						
	30	11.800	54.000							30	11.800	54.000						
	31	12.200	54.000							31	12.200	54.000						
	32	12.600	54.000							32	12.600	54.000						
	33	13.000	54.000							33	13.000	54.000						
	34	13.400	54.000							34	13.400	54.000						
	35	13.800	47.665							35	13.800	50.833						
	36	14.200	47.665							36	14.200	50.833						
	37	14.600	54.000							37	14.600	54.000						
	38	15.000	54.000							38	15.000	54.000						
	39	15.400	54.000							39	15.400	54.000						
	40	15.800	54.000							40	15.800	54.000						
	41	16.200	54.000							41	16.200	54.000						
	42	16.600	54.000							42	16.600	54.000						
	43	17.000	54.000							43	17.000	54.000						
	44	17.400	54.000							44	17.400	54.000						
	45	17.800	54.000							45	17.800	54.000						
	46	18.200	54.000							46	18.200	54.000						
	47	18.600	54.000							47	18.600	54.000						
	48	19.000	54.000							48	19.000	54.000						
	49	19.400	54.000							49	19.400	54.000						
	50	19.800	54.000							50	19.800	54.000						

(7)シート「中立軸計算 1」、「中立軸計算 2」および「中立軸計算 3」

中立軸位置計算時における繰り返し計算の収束状況を出力するシートである。3つのシートは、それぞれ正曲げの M-N 曲線、負曲げの M-N 曲線および「照査結果 2」の曲げ耐力計算に対応している。なお、出力の際には、諸元ケースあるいは断面力ケースをソースコードで指定する必要がある（パラメータ「num\_icode」）、現在のデフォルト値は 1（一つ目のケース）としている。

出力されるデータは、収束に至った収束回数と収束に至る中立軸位置の変化状況である。

表 4.2.7 に、シート「中立軸計算 1」の出力例を示す。



### 3. M-N 関係算出の定式

M-N 関係の算出方法は、道路橋示方書・耐震設計編に提示され、M- $\phi$  関係算出に適用される分割法によることとする。

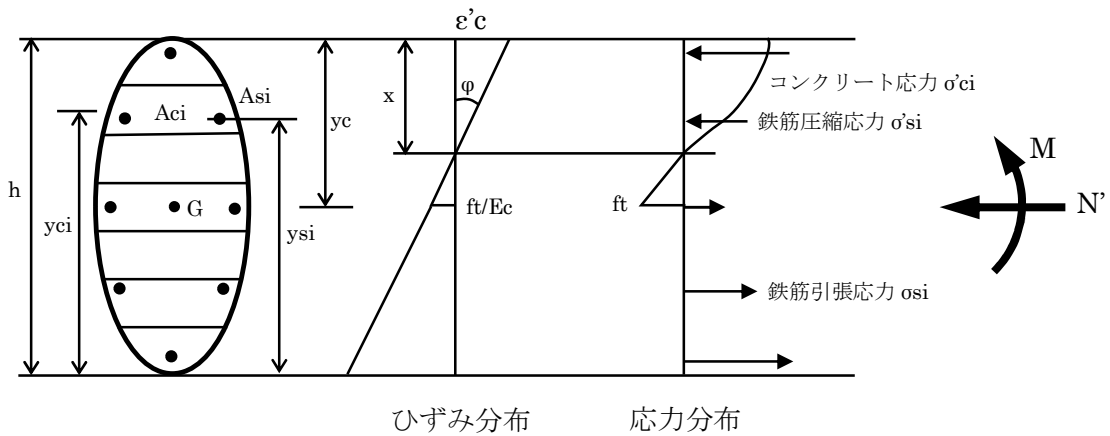
すなわち、断面高さ方向に部材断面を均等幅で分割し、それぞれの分割要素に発生するコンクリート応力と鉄筋に作用する応力をもとに、それらの寄与による力とモーメントの総計を計算し、断面に作用する曲げモーメントと軸力との釣り合いを考慮することで、軸力と抵抗モーメントの関係 (M-N 関係) を算出する。

この際、断面高さ方向の平面保持を仮定し、直ひずみの分布は直線的であるとする。

図 3-1 に、M-N 関係算出時の断面仮定を示す。

M-N 関係算出の概略手順は、以下の通りである。

- (1) 終局曲げモーメント  $M_u$ 、降伏曲げモーメント  $M_y$  およびひび割れ曲げモーメント  $M_c$  などの抵抗曲げモーメントを算出するための軸力値  $N$  を指定する。
- (2) 抵抗モーメント発生時 (終局、降伏およびひび割れ時) の曲率  $\phi$  を設定する。ここに、終局はコンクリート圧縮縁において終局ひずみに達する時、降伏は引張鉄筋が降伏ひずみに達する時、またひび割れ時はコンクリート引張縁において引張強度に達する時とする。このとき、中立軸位置  $x$  を仮定する。
- (3) (2)の曲率  $\phi$  からコンクリートひずみと鉄筋ひずみを求める。
- (4) コンクリートのひずみと鉄筋のひずみから、それぞれの応力を求める。このとき、コンクリートおよび鉄筋の応力・ひずみ関係として、図 3-2 に示すモデルを使用する。
- (5) RC 断面の直応力と軸力に関する釣り合いを考慮し、中立軸位置  $x$  を算出する。(2)で仮定した  $x$  について RC 断面の直応力と軸力が釣り合わないとき、中立軸位置を再設定し、(2)に戻る。RC 断面の直応力と軸力が釣り合うまで繰り返し計算を行う。
- (6) RC 断面の直応力、軸力および曲げモーメントに関するモーメントの釣り合いから、抵抗曲げモーメント ( $M_u, M_y$  および  $M_c$ ) を算出する。
- (7) 軸力値  $N$  を変更し(2)に戻り、以下同じ手順を繰り返す。



<記号の説明>

$h$  : 全高 (部材高)

$y_{ci}$  :  $i$  番目のコンクリート分割断面中心位置の座標 (引張縁からの距離) (m)

$y_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋位置の座標 (引張縁からの距離) (m)

$A_{ci}$  :  $i$  番目のコンクリート分割断面の面積 (m<sup>2</sup>)

$A_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋の鉄筋断面積 (m<sup>2</sup>)

$G$  : 断面図心位置

$y_c$  : 図心位置の圧縮縁からの距離

$x$  : 中立軸位置 (圧縮縁からの距離)

$f_t$  : コンクリート引張強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$f_y$  : 鉄筋降伏強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$f'_c$  : コンクリート圧縮強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$E_c$  : コンクリートヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$E_s$  : 鉄筋ヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$\phi$  : 曲率 (1/m)

$\sigma'_{ci}$  :  $i$  番目のコンクリート分割断面の圧縮応力

$\sigma'_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋の圧縮応力

$\sigma_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋の引張応力

$P'_{ci}$  :  $i$  番目のコンクリート分割断面の圧縮力

$P_{ci}$  :  $i$  番目のコンクリート分割断面の引張力

$P'_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋の圧縮力

$P_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋の引張力

$M'_{ci}$  :  $i$  番目のコンクリート分割断面の圧縮力による中立軸回りのモーメント

$M_{ci}$  :  $i$  番目のコンクリート分割断面の引張力による中立軸回りのモーメント

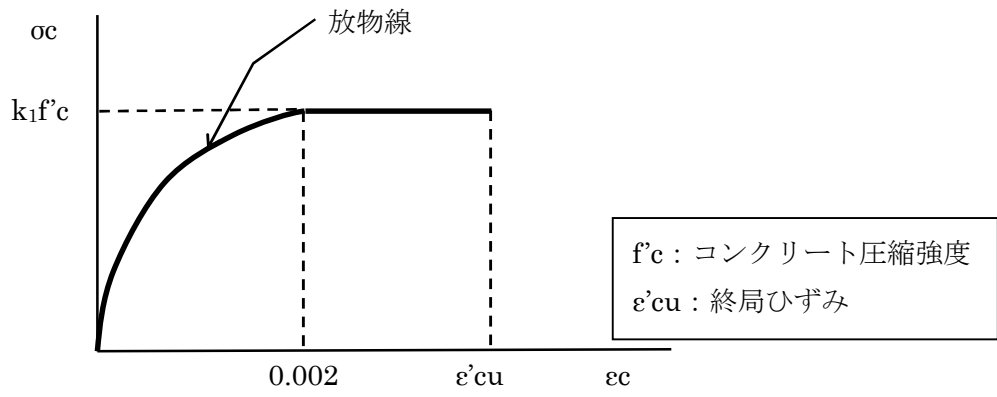
$M'_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋の圧縮力による中立軸回りのモーメント

$M_{si}$  :  $i$  番目の鉄筋の引張力による中立軸回りのモーメント

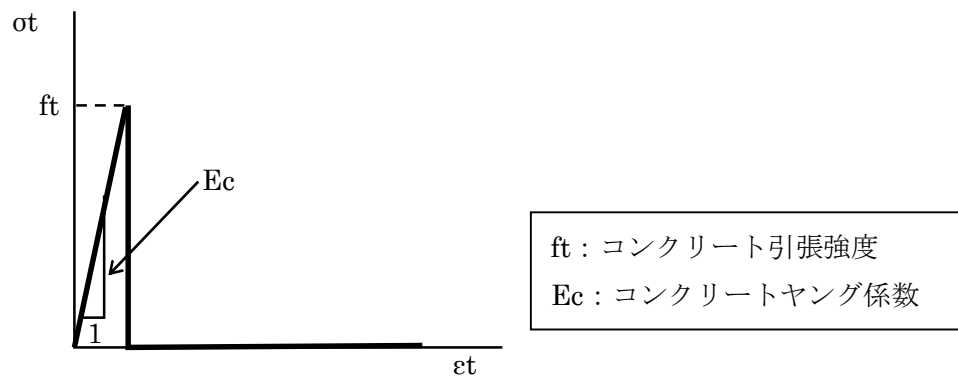
$M$  : 曲げモーメント

$N$  : 軸力

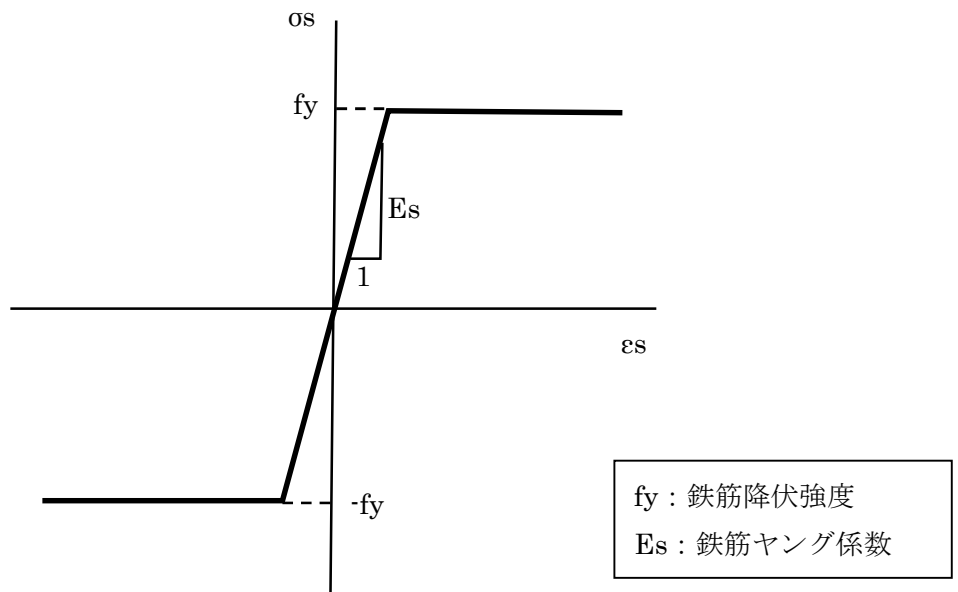
図 3-1 M-N 関係算出時の断面仮定



(a) コンクリートの応力・ひずみ関係 (圧縮側)



(b) コンクリートの応力・ひずみ関係 (引張側)



(c) 鉄筋の応力・ひずみ関係

図 3-2 コンクリートおよび鉄筋の応力・ひずみ関係

図 3-2 に示す応力・ひずみ関係を、式で表すと以下の通りである。

(a) コンクリートの応力・ひずみ関係 (圧縮側)

$$\sigma_c = \begin{cases} k_1 f'_c \frac{\varepsilon_c}{0.002} \left( 2 - \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right) & (\varepsilon_c < 0.002 \text{ のとき}) \\ k_1 f'_c & (0.002 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_{cu} \text{ のとき}) \end{cases} \quad 3(a)$$

ここに、 $\sigma_c$  : コンクリート圧縮応力(N/mm<sup>2</sup>)、

$\varepsilon_c$  : コンクリート圧縮ひずみ

$f'_c$  : コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$k_1 = 1 - 0.003 f'_c$  ( $\leq 0.85$ )

$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_c}{30000}$  ( $0.0025 \leq \varepsilon'_{cu} \leq 0.0035$ )

(b) コンクリートの応力・ひずみ関係 (引張側)

$$\sigma_t = \begin{cases} E_c \varepsilon_t & (\varepsilon_t < \frac{f_t}{E_c} \text{ のとき}) \\ 0 & (\varepsilon_t \geq \frac{f_t}{E_c} \text{ のとき}) \end{cases} \quad 3(b)$$

ここに、 $\sigma_t$  : コンクリート引張応力(kN/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon_t$  : コンクリート引張ひずみ

$E_c$  : コンクリートヤング係数(kN/m<sup>2</sup>)

$f_t$  : コンクリート引張強度(kN/m<sup>2</sup>)

(c) 鉄筋の応力・ひずみ関係

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \left( -\frac{f_y}{E_s} < \varepsilon_s < \frac{f_y}{E_s} \text{ のとき} \right) \\ f_y & \left( \varepsilon_s \leq -\frac{f_y}{E_s} \text{ あるいは } \varepsilon_s \geq \frac{f_y}{E_s} \right) \end{cases} \quad 3(c)$$

ここに、 $\sigma_s$  : 鉄筋応力(kN/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon_s$  : 鉄筋ひずみ

$E_s$  : 鉄筋ヤング係数(kN/m<sup>2</sup>)

$f_y$  : 鉄筋降伏強度(kN/m<sup>2</sup>)



以下では、先に記した概略手順に従い、M-N 関係算出の定式を示す。なお、図 3-1 の断面仮定および以下に示す定式は、部材断面形状が矩形以外に対しても適用可能であるが、本報告で提示するエクセルマクロについては、RC 矩形断面を対象とするものとなる。

圧縮側コンクリート応力による圧縮力  $P'_{ci}$  および引張側コンクリート応力による引張力  $P_{ci}$  は、次式で表される。

$$P'_{ci} = f_1\{(x - h + y_{ci})\phi\} \cdot A_{ci} \quad (\text{ただし、} y_{ci} > h - x) \quad 3(1)$$

$$P_{ci} = f_2\{(h - y_{ci} - x)\phi\} \cdot A_{ci} \quad (\text{ただし、} y_{ci} \leq h - x) \quad 3(2)$$

上式 3(1)において、 $f_1\{\varepsilon\}$ は圧縮ひずみ  $\varepsilon$  に対応するコンクリート圧縮応力であり、次式で表される。

$$f_1(\varepsilon) = k_1 f'_c \frac{\varepsilon}{0.002} \left(2 - \frac{\varepsilon}{0.002}\right) \quad (\varepsilon < \varepsilon_Z) \quad 3(3a)$$

$$= k_1 f'_c \quad (\varepsilon_Z \leq \varepsilon \leq \varepsilon'_{cu}) \quad 3(3b)$$

ここに、 $f'_c$  : コンクリート圧縮強度、 $\varepsilon_Z$  は塑性化時のひずみ (=0.002)

$$k_1 = 1 - 0.003 f'_c \quad (k_1 \leq 0.85)$$

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_c}{30000} \quad (0.0025 \leq \varepsilon'_{cu} \leq 0.0035)$$

上式 3(2)において、 $f_2\{\varepsilon\}$ は引張ひずみ  $\varepsilon$  に対応するコンクリート引張応力であり、次式で表される。

$$f_2(\varepsilon) = E_c \varepsilon \quad \left(\varepsilon < \frac{f_t}{E_c}\right) \quad 3(4a)$$

$$= 0 \quad \left(\varepsilon \geq \frac{f_t}{E_c}\right) \quad 3(4b)$$

ただし、コンクリート引張応力が引張強度  $f_t$  を超えたとき、すなわち  $\varepsilon > \frac{f_t}{E_c}$  のとき、 $P_{ci} = 0$  とする。

式 3(1)および(2)における  $\phi$  は、抵抗曲げモーメント発生時の曲率であり、降伏時、終局時およびひび割れ時において、それぞれ次式で表すことができる。

$$\text{降伏時} : \phi = \frac{f_y}{E_s(h - x - cv1)} \quad 3(5a)$$

$$\text{終局時} : \phi = \frac{\varepsilon'_{cu}}{x} \quad 3(5b)$$

$$\text{ひび割れ時} : \phi = \frac{f_t}{E_c(h - x)} \quad 3(5c)$$

ここに、 $f_y$  : 鉄筋降伏応力、 $E_s$  : 鉄筋ヤング係数、 $h$  : 部材の全高、 $x$  : 中立軸位置、 $cv1$  : 引張鉄筋被り、 $\varepsilon'_{cu}$  : 終局ひずみ、 $f_t$  : コンクリート引張強度、 $E_c$  : コンクリートヤング係数

圧縮側鉄筋応力による圧縮力  $P'_{si}$  および引張側鉄筋応力による引張力  $P_{si}$  は、次式で表される。

$$P'_{si} = E_S \cdot (x - h + y_{si})\varphi \cdot A_{si} \quad (\text{ただし、} y_{si} > h - x) \quad 3(6)$$

$$P_{si} = E_S \cdot (h - y_{si} - x)\varphi \cdot A_{si} \quad (\text{ただし、} y_{si} \leq h - x) \quad 3(7)$$

ここに、鉄筋降伏強度を超えたとき、すなわち $(x - h + y_{si})\varphi > f_y/E_S$ および $(h - y_{si} - x)\varphi > f_y/E_S$ のとき、それぞれ $P'_{si} = f_y A_{si}$ 、 $P_{si} = f_y A_{si}$  とする。

以上より、直応力の合力と軸力の釣り合いから、次式が成立する。

$$\sum_i P'_{ci} - \sum_i P_{ci} + \sum_i P'_{si} - \sum_i P_{si} - N' = 0 \quad 3(8)$$

式 3(8)の左辺は曲率  $\varphi$  と中立軸位置  $x$  を定めると計算可能なので、設定した  $\varphi$  に対し  $x$  を 0 から漸増的に変化させ、式 3(8)の左辺の符号が反転する  $x$  を求めることで、設定した曲率に対する中立軸位置  $x$  を算出することができる。

次に、曲げモーメントを求める。

圧縮側コンクリートによる中立軸周りのモーメント  $M'_{ci}$  と引張側コンクリートによる中立軸周りのモーメント  $M_{ci}$  は、次式で表される。

$$M'_{ci} = f_1\{(x - h + y_{ci})\varphi\} \cdot A_{ci} \times (x - h + y_{ci}) \quad (\text{ただし、} y_{ci} > h - x) \quad 3(9)$$

$$M_{ci} = f_2\{(h - y_{ci} - x)\varphi\} \cdot A_{ci} \times (h - y_{ci} - x) \quad (\text{ただし、} y_{ci} \leq h - x) \quad 3(10)$$

ここに、 $f_1\{\varepsilon\}$ は圧縮ひずみ  $\varepsilon$  に対応するコンクリート圧縮応力、 $f_2\{\varepsilon\}$ は引張ひずみ  $\varepsilon$  に対応するコンクリート引張応力であり、それぞれ式 3(3)および 3(4)で表される。

ただし、コンクリート引張応力が引張強度  $f_t$  を超えたとき、すなわち $\varepsilon > \frac{f_t}{E_c}$  のとき、 $M_{ci} = 0$  とする。

圧縮側鉄筋による中立軸周りのモーメント  $M'_{si}$  と引張側鉄筋による中立軸周りのモーメント  $M_{si}$  は、次式で表される。

$$M'_{si} = E_S \cdot (x - h + y_{si})\varphi \cdot A_{si} \times (x - h + y_{si}) \quad (\text{ただし、} y_{si} > h - x) \quad 3(11)$$

$$M_{si} = E_S \cdot (h - y_{si} - x)\varphi \cdot A_{si} \times (h - y_{si} - x) \quad (\text{ただし、} y_{si} \leq h - x) \quad 3(12)$$

上式で鉄筋降伏強度を超えたとき、すなわち $(x - h + y_{si})\varphi > f_y/E_S$ および $(h - y_{si} - x)\varphi > f_y/E_S$ のとき、それぞれ $M'_{si} = f_y A_{si} \times (x - h + y_{si})$ 、 $M_{si} = f_y A_{si} \times (h - y_{si} - x)$  とする。

以上より、直応力、軸力および曲げモーメントの中立軸位置周りのモーメントの釣り合いから、次式が成立する。ここで、軸力は断面図心位置に作用するものとする。

$$M = \sum_i M'_{ci} + \sum_i M_{ci} + \sum_i M'_{si} + \sum_i M_{si} - N' \times (x - y_c) \quad 3(13)$$

式 3(13)により、設定した  $\varphi$  に対して算出した中立軸位置  $x$  を用いて、曲げモーメント  $M$  を求めることができる。

#### 4. M-N 相互作用図の計算手順

エクセルマクロにおける M-N 図作成の計算手順は、以下の通りである。

##### (1) 諸元データの読み込み

以下の断面諸元に関するデータを読み込む。

①高さ方向断面分割数、②断面の全高、③断面幅、④鉄筋ヤング係数、⑤鉄筋降伏強度、⑥コンクリートヤング係数、⑦コンクリート圧縮強度、⑧コンクリート引張強度、⑨鉄筋材料係数、⑩コンクリート材料係数、⑪部材係数、⑫引張鉄筋断面積、⑬引張鉄筋被り、⑭圧縮鉄筋断面積、⑮圧縮鉄筋被り、⑯軸力の計算分割数

##### (2) 追加配筋データの読み込み

以下の追加配筋データを読み込む。

①追加配筋の段数、②追加配筋の鉄筋断面積、③追加配筋の引張縁からの距離

##### (3) 分割要素の座標および面積の算出

分割したコンクリート要素の断面積および要素中心座標、鉄筋の断面積と座標を算出し、配列にストアする。また、それらの分割断面データをシートに書き出す。なお、分割要素のコンクリート断面積は、ソースコード内のフラグ `iflag3=1` のとき、鉄筋断面積を差し引くこととする。現ソースコードは `iflag3=1` としている。

##### (4) 限界圧縮ひずみとコンクリート強度に乘じる係数の設定

コンクリート圧縮時における 2 種の限界ひずみ、応力値が一定に移行するひずみ  $\varepsilon_z (=0.002)$  と終局ひずみ  $\varepsilon'_{cu}$  を設定する。終局ひずみおよびコンクリート強度に乘じる係数 `ck1` は、コンクリート標準示書に従い、コンクリート強度  $f'_c$  により次式で算出する。

$$\varepsilon_z = 0.002$$

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155-f'_c}{30000} \quad (0.0025 \leq \varepsilon'_{cu} \leq 0.0035)$$

$$ck1 = 1 - 0.003 \cdot f'_c \quad (ck1 \leq 0.85)$$

ここに、 $\varepsilon_z$  : 応力が一定値に移行するひずみ

$\varepsilon'_{cu}$  : 終局ひずみ

`ck1` : コンクリート強度に乘じる係数

$f'_c$  : コンクリート強度 (N/mm<sup>2</sup>)

##### (5) 鉄筋被りの再設定

追加配筋データを考慮し、追加配筋を含む全て鉄筋位置から、最外縁の鉄筋に対する被りを求める。

`cv1d` : 引張側鉄筋の被り (単位 : m)

`cv2d` : 圧縮側鉄筋の被り (単位 : m)

##### (6) 曲げモーメント正側 (`js=1`) と負側 (`js=2`) の計算ループの開始 (引数 `js` のループ)

(7)負側 (js=2) のとき座標データ等の修正

(3)での座標および面積の設定は、正曲げを前提にしているので、負曲げの場合には、座標および面積のデータに関し、上面と下面を逆転させるように修正する。

(8)断面図心位置の計算

鉄筋についてはヤング係数比を考慮し、換算断面積および換算断面1次モーメントにより図心位置を算出する。この計算は、断面軸方向の力の釣り合い式およびモーメントの釣り合い式を立てる際に、軸力が断面図心位置に作用することを考慮するために必要となる。

(9)3つのモード (j=1:降伏、j=2:終局、j=3:ひび割れ) の計算ループの開始 (引数jのループ)

(10)軸力最小値 (ndmin) および軸力最大値 (ndmax) の計算

計算する軸力範囲を設定するために、軸力の最小値および最大値をそれぞれ純引張破壊および純圧縮破壊として算出を行う。ここに、ndmin および ndmax は、以下の式により算出する。

$$ndmin = -fy \cdot arsall \quad 4(1)$$

$$ndmax = ck1 \cdot fc \cdot (b \cdot h - arsall) + fy \cdot arsall \quad 4(2)$$

ここに、fy:鉄筋降伏強度、fc:コンクリート圧縮強度、arsall:軸方向鉄筋の全断面積、b:断面幅、h:断面の全高、ck1:コンクリート強度に乗じる係数 ((4)の記載を参照)

(11)釣合軸力の計算

限界ひずみで規定される中立軸位置と曲率をもとに、断面軸方向の力の釣り合いから釣合軸力を算出する (図4-1参照)。すなわち、圧縮縁が終局ひずみに、引張鉄筋が降伏に同時に達するときの中立軸位置  $x_b$  と曲率  $\phi_b$  を求め、そのときのひずみ分布に対応する応力分布と軸力との釣合条件により、釣合軸力を算出する。釣合軸力時の中立軸位置  $x_b$  と曲率  $\phi_b$  は、次式で設定される。

$$x_b = \frac{(h - cv1) \cdot \epsilon'_{cu}}{(\epsilon'_{cu} + fy/Es)} \quad 4(3)$$

$$\phi_b = \frac{\epsilon'_{cu}}{x_b} \quad 4(4)$$

ここに、h:断面の全高、cv1:引張鉄筋かぶり、 $\epsilon'_{cu}$ :終局ひずみ、fy:鉄筋降伏強度、Es:鉄筋ヤング係数である。

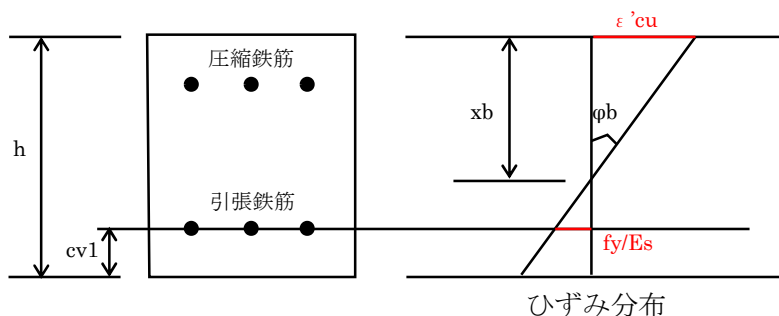


図 4-1 釣合軸力時のひずみ分布

(12)全断面引張（ほぼ全断面引張）時および全断面圧縮（ほぼ全断面圧縮）時の軸力の算出

axi\_cr(icase, 1, j, js) : 軸力最小値 (=ndmin、純引張)

axi\_cr(icase, 2, j, js) : 全断面引張発生時（ほぼ全断面引張発生時）の軸力

axi\_cr(icase, 3, j, js) : 釣合軸力

axi\_cr(icase, 4, j, js) : 全断面圧縮発生時（ほぼ全断面圧縮発生時）の軸力

axi\_cr(icase, 5, j, js) : 軸力最大値 (=ndmax、純圧縮)

ここに、icase : ケース番号、j : 1 が降伏、2 が終局、3 がひび割れ、js : 1 が正曲げ、2 が負曲げ

なお、上記の軸力最小値および軸力最大値は、RC 断面が純引張状態あるいは純圧縮状態における軸力の最小・最大値をである。一方、全断面引張発生時と全断面圧縮発生時とは、曲げが作用した状態（曲げモーメントがゼロではない）において、以下に示す中立軸位置  $x$  になった時である。

・降伏時

全断面引張時 :  $x=0$  のとき

ほぼ全断面圧縮時 :  $x=h-cv1$  のとき（計算上  $x=(h-cv1)*0.99999$ ）

ここに、 $x$  : 圧縮縁から中立軸までの距離、 $h$  : 部材の全高、 $cv1$  : 引張鉄筋の被り

・終局時

ほぼ全断面引張時 :  $x=0$  のとき（計算上  $x=0.00001$ ）

全断面圧縮時 :  $x=h$  のとき

ここに、 $x$  : 圧縮縁から中立軸までの距離、 $h$  : 部材の全高

・ひび割れ時

全断面引張時 :  $x=0$  のとき

ほぼ全断面圧縮時 :  $x=h$  のとき（計算上  $x=h*0.99999$ ）

ここに、 $x$  : 圧縮縁から中立軸までの距離、 $h$  : 部材の全高

(13)軸力に対応する抵抗曲げモーメントを求める計算ループの開始（引数  $i$  のループ）

軸力を最小軸力 (ndmin) から最大軸力 (ndmax) の値まで変化させ、それぞれに対応する抵抗曲げモーメントを算出する。このとき、最小軸力から最大軸力までを、均等分割した軸力に対して曲げモーメントを求める。均等分割する数は、手順(1)でのデータ「⑩軸力の計算分割数」に従う。

(14)中立軸位置算出時の解の存在判定

降伏 ( $j=1$ ) については、中立軸位置  $x$  (圧縮縁から中立軸までの距離) が  $-kk2 \times h < x < h - cv1$  に存在するかどうかを確認する。また、終局 ( $j=2$ ) については、 $0 < x < kk1 \times h$  に存在するかどうかを確認する。さらに、ひび割れ ( $j=3$ ) については、 $-kk2 \times h < x < h$  に存在するかどうかを確認する。ここに、 $h$  : 断面の全高、 $cv1$  : 引張鉄筋かぶり、 $kk1, kk2$  : 中立軸の計算範囲を定めるパラメータ（ソースコード内のデフォルト値は 10）である。

解が存在する場合、降伏に対しては「現在の  $x$ 」を  $h - cv1$ 、「一つ前の  $x$ 」を  $-kk2 \times h$ 、「一つ前の  $sx$ 」を  $x = -kk2 \times h$  での  $sx$  の値として、2 分法による求解に移行する。ここに、 $sx$  は断面軸方向のコンクリートおよび鉄筋の応力値と軸力の総和であり、式 3(8)の左辺の値に相当する。また、終局に対しては「現在の  $x$ 」を  $kk1 \times h$ 、「一つ前の  $x$ 」を 0、「一つ前の  $sx$ 」を  $x=0$  での  $sx$  の値として、2 分法による求解に移行する。さらに、ひび割れに対しては「現在の  $x$ 」を  $h$ 、「一つ前の  $x$ 」を  $-kk2 \times h$ 、「一つ前の  $sx$ 」を  $x = -kk2 \times h$  での  $sx$  の値として、2 分法による求解に移行する。

解が存在しない場合、中立軸位置  $x$  に 999.0、曲げモーメントに 0 を入力して、次ステップへの計算に移行する。

#### (15)2 分法による中立軸位置の求解

(14)で定めた「現在の  $x$ 」、「一つ前の  $x$ 」および「一つ前の  $sx$ 」を初期値として、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 3(8)の左辺に対応している。

本マクロで中立軸を求める際、断面高さ方向の 2 点 ( $x=x_1, x_2$ ) における  $f(x)$ の値を求め、 $f(x_1)$ と  $f(x_2)$ の符号が異なる場合に、 $x_1 < x < x_2$  に中立軸があると判断する ( $f(x)$ の単調増加あるいは単調減少を仮定)。すなわち、現在の  $x (=x_n)$  を  $x_2$ 、一つ前の  $x (=x_{n1})$  を  $x_1$  として、その間に解が存在するものとしている。なお、降伏時、終局時およびひび割れ時における  $x_1$  および  $x_2$  の具体的な初期設定値は、手順(14)に記載した通りである。

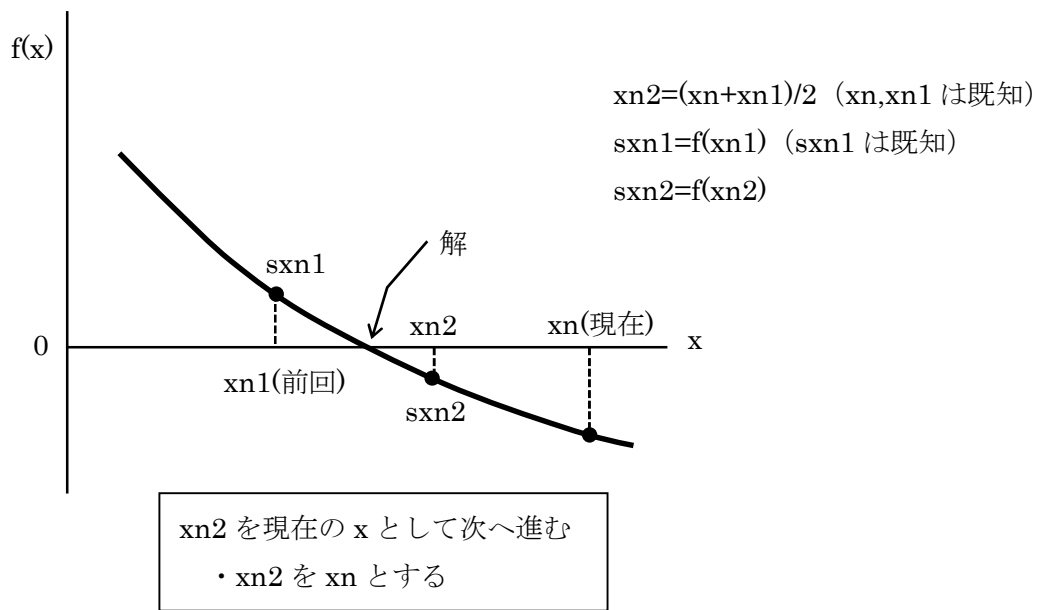
2 分法は、 $x_{n1}$  と  $x_n$  の間で、より正確な  $x$  を算出するための繰り返し計算に適用される。

図 4-2 に、2 分法の考え方を示す。

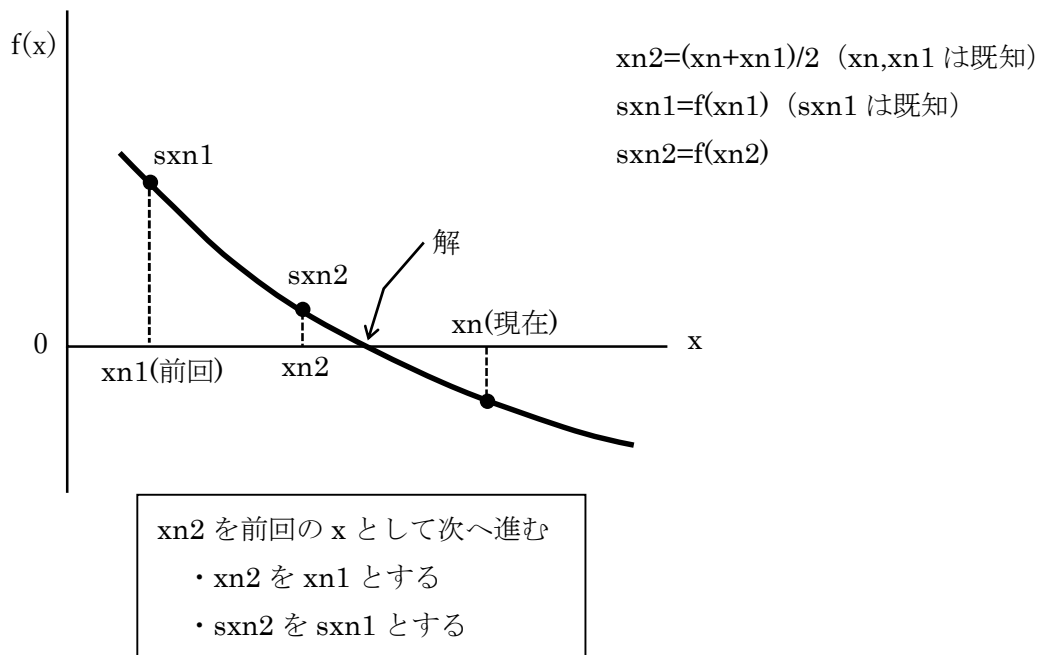
2 分法の求解の手順は、以下の通りである。

- 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  $sx_{n2}$  と  $x_{n1}$  に対する  $f(x)$ の値  $sx_{n1}$  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  $sx_{n2}$  と  $x_{n1}$  に対する  $f(x)$ の値  $sx_{n1}$  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  $x_{n1}$ 、 $sx_{n2}$  を  $sx_{n1}$  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。

2 分法による繰り返し計算の出発時点において、図 4-2 の  $x_{n1}$  (1 つ前の  $x$  の値)、 $x_n$  (現在の  $x$  の値) および  $sx_{n1}$  (1 つ前の  $f(x)$ の値) は、既知であることを前提とする。



(a)  $xn1$  と  $xn$  の中点の  $f(x)$  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  $xn$  の中点の  $f(x)$  の符号が反転しない場合  
 ( $xn2$  と  $xn$  の間に解がある場合)

図 4-2 2分法の考え方

2分法において、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。また、繰り返し回数が100回に達した場合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回程度で計算が収束していることから、デフォルト値を100回と設定したものである。また、収束誤差については、 $Abs((x_n - x_{n1})/x_n) < \epsilon$  ( $x_n$ :現在の $x$ 、 $x_{n1}$ :一つ前の $x$ 、 $\epsilon$ :許容誤差で $10^{-5}$ )のとき収束と判定している。

なお、断面軸方向の力の総和 $s_x$ の計算には、中立軸位置 $x$ と曲率 $\varphi$ が必要であるが、仮定した中立軸位置に対する降伏時、終局時およびひび割れ時の曲率は、それぞれの条件におけるひずみ分布を考慮し、以下の式により算出している。

$$\text{降伏時: } \varphi = \frac{f_y}{E_s(h-x-cv1)} \quad 4(5)$$

$$\text{終局時: } \varphi = \frac{\epsilon'_{cu}}{x} \quad 4(6)$$

$$\text{ひび割れ時: } \varphi = \frac{f_t}{E_c(h-x)} \quad 4(7)$$

ここに、 $f_y$ :鉄筋降伏強度、 $E_s$ :鉄筋ヤング係数、 $h$ :断面の全高、 $x$ :中立軸位置(圧縮縁からの距離)、 $cv1$ :引張鉄筋かぶり、 $\epsilon'_{cu}$ :コンクリート圧縮時の終局ひずみ(=0.0035)、 $f_t$ :コンクリート引張強度、 $E_c$ :コンクリートヤング係数

#### (16)抵抗曲げモーメントの計算

(15)で算出した中立軸位置をもとに、降伏時( $j=1$ )、終局時( $j=2$ )およびひび割れ時( $j=3$ )の抵抗曲げモーメントを算出する。この計算には、モーメントの釣り合い式(式3(13))を用い、コンクリートおよび鉄筋の直応力と軸力に寄与によるモーメントを総和して算出できる。(14)の計算と同様に、中立軸位置 $x$ と曲率 $\varphi$ が必要であるが、曲率の計算には式4(5),4(6)および4(7)を使用している。

#### (17)中立軸位置、曲げモーメントおよび軸力値の配列へのストア

中立軸位置、曲げモーメントおよび軸力を、それぞれ配列 $xx(icase,i,j,js)$ 、 $mom(icase,i,j,js)$ および $axi(icase,i,j,js)$ に保存する。ここに、 $icase$ :諸元ケース番号、 $i$ :分割した軸力の番目、 $j$ :降伏、終局およびひび割れがそれぞれ1、2および3、 $js$ :正曲げが1で負曲げが2である。

この後、引数 $i$ のループの先頭の手順(13)に戻る。さらに、引数 $j$ のループの先頭の手順(9)に戻る。そしてさらに、引数 $js$ のループの先頭の手順(6)に戻る。以上の手順により、 $My-N$ 、 $Mu-N$ および $Mc-N$ の計算は終了する。

#### (18)中立軸収束状況の書き出し

指定した諸元ケースについて、中立軸位置の収束状況を書き出す。計算させた軸力ごとに、収束回数と収束までに至る中立軸位置の変化をシート上に書き出す(正曲げ:Sheet1、負曲げ:Sheet2)。この繰り返し回数が100に達していた場合、許容誤差に対して未収束の可能性はある。

#### (19)icaseループの終了

1つの諸元データの計算が終了し、次の諸元データの計算に移行する。手順(1)に戻る。



## (20)My-N、Mu-N および Mc-N の書き出し

正曲げおよび負曲げに対し、My-N 関係、Mu-N および Mc-N 関係をシート上に書き出す。My(+)-N 関係、My(-)-N 関係、Mu(+)-N 関係、Mu(-)-N 関係、Mc(+)-N および Mc(-)-N 関係の 6 種が、それぞれ別々のシートに書き出される。ここに、Mu-N 関係については、部材係数 **gamb** を考慮した場合（手順(1)の⑩データ）、(16)で算出された終局曲げモーメントが **gamb** で除されていることに注意する。

## (21)断面力照査に移行

以上で計算された降伏および終局曲げモーメントを用いて、断面力照査に移行する。

## (22)設計断面力の入力

設計曲げモーメント **fmd**、設計軸力 **fnd** および選択する諸元ケース **ip** を読み込む。このうち、選択する諸元ケースとは、設計断面力を適用させる諸元ケース番号を示す。諸元ケース番号は、手順(1)で読み込んだ断面諸元のケース番号に対応している。

## (23)設計軸力の適用範囲チェック

設計軸力が、最大・最小軸力の範囲内にあることを確認する。範囲内に無い場合、降伏曲げモーメント、降伏時超過率、終局曲げモーメントおよび終局時照査値に、全てゼロを入力し、次ステップに進む。

このとき、最大軸力は、部材係数 **gamb** を考慮した場合（手順(1)の⑩データ）、(10)で示した **ndmax** を **gamb** で除した値を用いる。

## (24)降伏曲げモーメントに対する照査

My-N 関係から降伏曲げモーメントを取得し、設計曲げモーメントと比較して照査を行う。

## (25)降伏曲げモーメントの取得

i 番目の軸力を配列 **rn(i)** に、i 番目の軸力に対応する降伏曲げモーメントを配列 **rm(i)** に取得する。この際、設計曲げモーメント **fmd** の正負に応じて、正曲げあるいは負曲げの降伏曲げモーメントを区別して取得する。

## (26)設計軸力に対する降伏曲げモーメントおよび照査値の算出

設計軸力 **fnd** が軸力 **rn(i)~rn(i+1)** のうち何番目にあるかを判定し、内挿により降伏曲げモーメント **my** を算出する。また、 $rmy = \text{Abs}(fmd) / \text{Abs}(my)$  (**fmd** : 設計曲げモーメント) により、降伏時超過率を算出する。

## (27)終局曲げモーメントに対する照査

Mu-N 関係から終局曲げモーメントを取得し、設計曲げモーメントと比較して照査を行う。

## (28)終局曲げモーメントの取得

i 番目の軸力を配列 **rn(i)** に、i 番目の軸力に対応する終局曲げモーメントを配列 **rm(i)** に取得する。この際、設計曲げモーメント **fmd** の正負に応じて、正曲げあるいは負曲げの終局曲げモーメントを区別して取得する。

(29)設計軸力に対する終局曲げモーメントおよび照査値の算出 (N 一定)

設計軸力  $fnd$  が軸力  $rn(i) \sim rn(i+1)$  のうち何番目にあるかを判定し、内挿により N 一定の終局曲げモーメント  $\mu$  を算出する。また、 $rmy = \text{Abs}(fmd) / \text{Abs}(\mu)$  ( $fmd$ : 設計曲げモーメント) により、N 一定に対する終局時照査値を算出する。

(30)M/N 一定の終局曲げモーメントに対する照査

原点と設計断面力点 ( $fmd, fnd$ ) を結ぶ直線を描き、Mu-N 曲線と交わる点の終局曲げモーメント  $\mu_2$  を求め、 $fmd$  と比較することにより照査を行う (図 4-3 参照)。

$\mu_2$  は、次式により計算した。

$$\mu_2 = \frac{b}{k-a} \quad 4(8)$$

$$k = \frac{fnd}{|fmd|} \quad 4(9)$$

$$a = \frac{rn(i+1) - rn(i)}{rm(i+1) - rm(i)} \quad 4(10)$$

$$b = \frac{rm(i+1) \cdot rn(i) - rm(i) \cdot rn(i+1)}{rm(i+1) - rm(i)} \quad 4(11)$$

ここに、 $rm(i+1), rm(i)$ : i 番目および i+1 番目の軸力に対応する終局曲げモーメント

$rn(i+1), rn(i)$ : i 番目および i+1 番目の軸力

$a, b$ : 点( $rm(i), rn(i)$ ) と点( $rm(i+1), rn(i+1)$ )を結ぶ直線の係数値 (直線の式:  $y=a \cdot x+b$ )

$k$ : 原点と点( $fmd, fnd$ )を結ぶ直線の勾配

(31)断面力、抵抗モーメントおよび照査値の配列へのストア

断面力ケースごとに、設計曲げモーメント、設計軸力、選択した諸元ケース、降伏曲げモーメント、降伏時照査値、N 一定の終局曲げモーメント、N 一定の終局時照査値、M/N 一定の終局曲げモーメント、M/N 一定の終局時照査値を配列にストアする。

(32)照査結果の書き出し

照査値等の照査結果をシートに書き出す。

(33)断面力ケースを同一の諸元ケースごとにまとめて並べ直す

設計断面力を M-N 図にプロットし易くするため、同一の諸元ケースでまとめて表示する。

(34)照査値の書き出し

諸元ケース、断面力ケース、設計曲げモーメント、設計軸力、降伏曲げモーメント、照査値  $Md/My$ 、判定 ( $My$ )、N 一定の終局曲げモーメント、N 一定の照査値  $Md/Mu$ 、判定 (N 一定  $Mu$ )、M/N 一定の終局曲げモーメント、M/N 一定の照査値  $Md/Mu$ 、判定 (M/N 一定  $Mu$ ) の順に書き出される。

ここに、終局曲げモーメントと照査値  $Md/Mu$  については、部材係数  $gamb$  を考慮した場合、終局曲げモーメントが  $gamb$  で除され、照査値  $Md/Mu$  に  $gamb$  を乗じる。

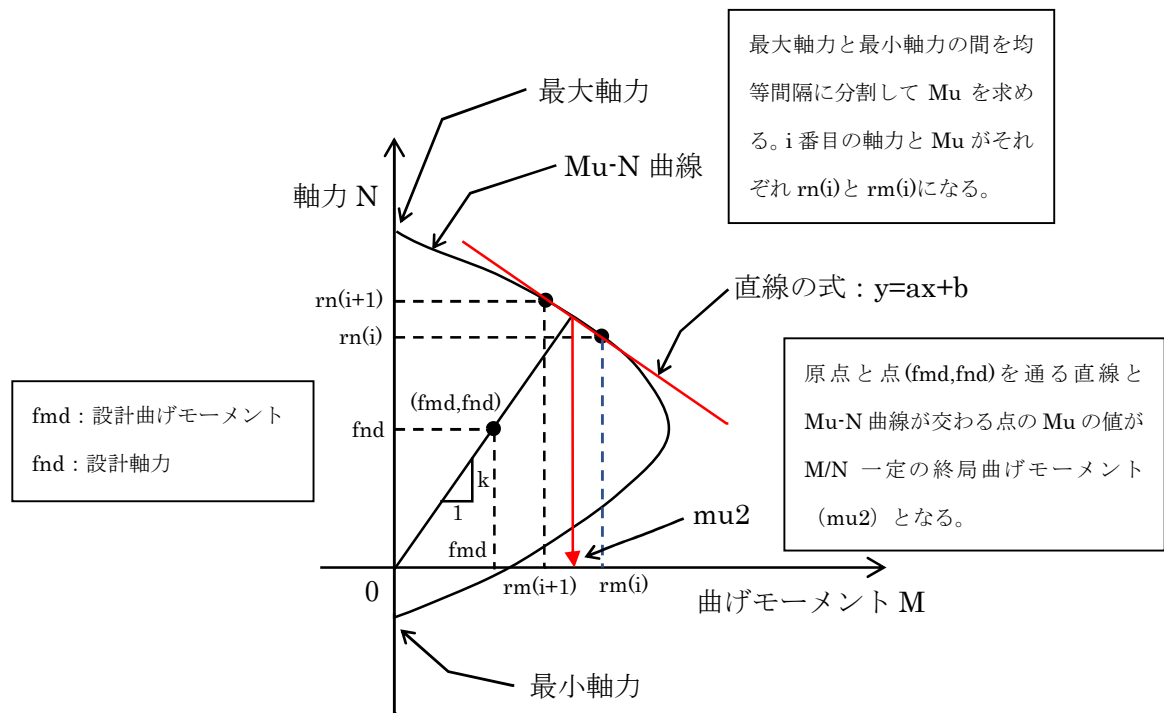


図 4-3  $M/N$  一定の終局曲げモーメント

(35)設計軸力に対する降伏および終局曲げモーメントを直接に求める計算の開始

(34)で書き出された照査値は、予め算出した  $M-N$  関係の内挿計算によって求めた抵抗曲げモーメントと設計断面力を組み合わせて算出されたものである。以下では、設計軸力に直接に対応する抵抗曲げモーメントを算出し、それと設計曲げモーメントを組み合わせて照査値を算出する。なお、ここでは  $N$  一定の終局曲げモーメントを算出し、 $M/N$  一定の終局曲げモーメントは算出しない。

(36)設計断面力の入力 [抵抗モーメントの直接計算]

(22)と同様の手順を再度実行する。

(37)諸元データの読み込み [抵抗モーメントの直接計算]

(1)と同様の手順を実行する。ただし、(36)で入力した設計断面力に対応する諸元ケース  $ip$  に適合する諸元データを読み込む。

(38)追加配筋データの読み込み [抵抗モーメントの直接計算]

(2)と同様の手順を実行する。ただし、(36)で入力した設計断面力に対応する諸元ケース  $ip$  に適合する追加配筋データを読み込む。

(39)分割要素の座標および面積の算出 [抵抗モーメントの直接計算]

(3)と同様の手順を実行する。ただし、分割断面データのシートへの書き出しは実行しない。

(40)限界圧縮ひずみとコンクリート強度に乘じる係数の設定 [抵抗モーメントの直接計算]

(4)と同様の手順を実行する。

(41)設計曲げモーメントが負の時の座標データ等の修正 [抵抗モーメントの直接計算]

設計曲げモーメント  $f_{md}$  が負のとき、(7)と同様の手順を実行する。

(42)断面図心位置の計算 [抵抗モーメントの直接計算]

(8)と同様の手順を実行する。

(43)最大最小軸力の計算 [抵抗モーメントの直接計算]

(10)と同様の手順を実行する。また、設計軸力  $f_{nd}$  が最大最小軸力の範囲外るとき、照査を実施しない。

(44)2つのモード ( $j=1$ : 降伏、 $j=2$ : 終局) に対する計算ループの開始 (引数  $j$  のループ)

[抵抗モーメントの直接計算]

(45)中立軸位置算出時の解の存在判定 [抵抗モーメントの直接計算]

降伏時 ( $j=1$ ) および終局時 ( $j=2$ ) における解の存在判定を、(14)と同様の手順で実行する。

(46)2分法による中立軸位置の求解 [抵抗モーメントの直接計算]

降伏時 ( $j=1$ ) および終局時 ( $j=2$ ) に対し、(15)と同様の手順を実行する。

(47)抵抗曲げモーメントの計算 [抵抗モーメントの直接計算]

降伏時 ( $j=1$ ) および終局時 ( $j=2$ ) に対し、(16)と同様の手順を実行する。

(48)中立軸位置、曲げモーメントおよび軸力値の配列へのストア [抵抗モーメントの直接計算]

$xx(1,1,j,1)$ : 中立軸位置 (圧縮縁からの距離: cm)

$mom(1,1,j,1)$ : 抵抗曲げモーメント (kNm)

$axi(1,1,j,1)$ : 軸力 (kN)

ここに、 $j$  はモードの区別であり、 $j=1$  のとき降伏、 $j=2$  のとき終局である。

この後、手順(43)に戻る。

(49)中立軸収束状況の書き出し [抵抗モーメントの直接計算]

指定した諸元ケースについて、中立軸位置の収束状況を書き出す。計算させた軸力ごとに、収束回数と収束までに至る中立軸位置の変化をシート上書き出す (Sheet3)。

(50)降伏曲げモーメントおよび終局曲げモーメント等の書き出し [抵抗モーメントの直接計算]

断面力ケース  $jc_{case}$ 、選択した諸元ケース  $ip$ 、設計曲げモーメント  $f_{md}$ 、設計軸力  $f_{nd}$ 、降伏曲げモーメント  $m_{omy}$ 、照査値(降伏)、判定(降伏)、終局曲げモーメント  $m_{omu}$ 、照査値(終局)、および判定(終局)を、シート「照査結果 2」に出力される。

上記の照査値は、降伏に関し降伏曲げモーメントに対する設計曲げモーメントの比、終局に関し終局

曲げモーメントに対する設計曲げモーメントの比で表される。また、終局については、部材係数 **gamb** を考慮した場合（手順(1)の⑩データ）、終局曲げモーメントが **gamb** で除されていることに注意する必要がある。

(51)jcase ループの終了 [抵抗モーメントの直接計算]

1つの設計断面力に対する計算が終了。次の設計断面力の計算に移行する。手順(36)に戻る。

## 5. 試算例（市販ソフトとの比較）

### 5.1 解析条件

以下では、M-N 相互作用図作成の試算例を示す。また、市販ソフト（フォーラムエイト「RC 断面計算」）との比較も実施する。

表 5.1-1 に、検討に使用した断面諸元を示す。また、表 5.1-2 に、検討に使用した設計断面力を示す。

表 5.1-1 検討に用いた断面諸元

諸元	ケース 1 (対称配筋)	ケース 2 (非対称配筋)
諸元ケース	1	2
断面高さ方向の分割数	50	50
断面の全高 (cm)	20	20
断面の幅 (cm)	135	135
鉄筋ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	200	200
鉄筋降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	345	345
コンクリートヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	29.5	29.5
コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	35	35
コンクリート引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.46 (=0.23fc <sup>(2/3)</sup> )	2.46 (=0.23fc <sup>(2/3)</sup> )
鉄筋材料係数	1.0	1.0
コンクリート材料係数	1.0	1.0
部材係数	1.0	1.0
引張鉄筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	12.67 (10-D13)	12.67 (10-D13)
引張鉄筋かぶり (cm)	6	6
圧縮鉄筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	12.67 (10-D13)	6.335 (5-D13)
圧縮鉄筋かぶり (cm)	6	6
軸力の計算分割数	100	100

表 5.1-2 検討に用いた設計断面力

項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
断面力ケース	1	2	3	4
設計曲げモーメント Md(kNm)	130	-130	110	-100
設計軸力 Nd(kN)	1400	1800	1400	1700
選択する諸元ケース	1	1	2	2

## 5.2 解析結果

図 5.2-1 に、諸元ケース 1 の M-N 相互作用図を示す。図には、終局曲げモーメント  $M_u$ 、降伏曲げモーメント  $M_y$  およびひび割れ曲げモーメント  $M_c$  に対する 3 種の M-N 相互作用図を示している。

同図によれば、 $M_u$ -N については、曲げモーメントがゼロとなる最小軸力から最大軸力までが図示されているが、 $M_y$ -N および  $M_c$ -N については、ある大きさの軸力までしか図示されていない。この理由は、 $M_y$ -N については、釣合軸力より大きい軸力において鉄筋降伏よりも先行して圧壊（圧縮ひずみが限界ひずみに達する）が生じるからであり、 $M_c$ -N については、ある軸力以上の領域においてひび割れ発生に先行して圧壊が生じるからである。

図 5.2-2 に、諸元ケース 1 および 2 の M-N 相互作用図と市販ソフトによる算出結果を示す。同図によれば、両ケースともに、市販ソフトの結果とほぼ一致することが見てとれる。

図 5.2-3 に、M-N 相互作用図に設計断面力をプロットした図を示す。

同図によれば、本試算例の設計断面力の M-N 図におけるプロット点 ( $M_d, N_d$ ) が、 $M_y$ -N および  $M_u$ -N 曲線の内部に存在することから、降伏および終局のいずれの限界状態に対しても安全性を担保できることがわかる。

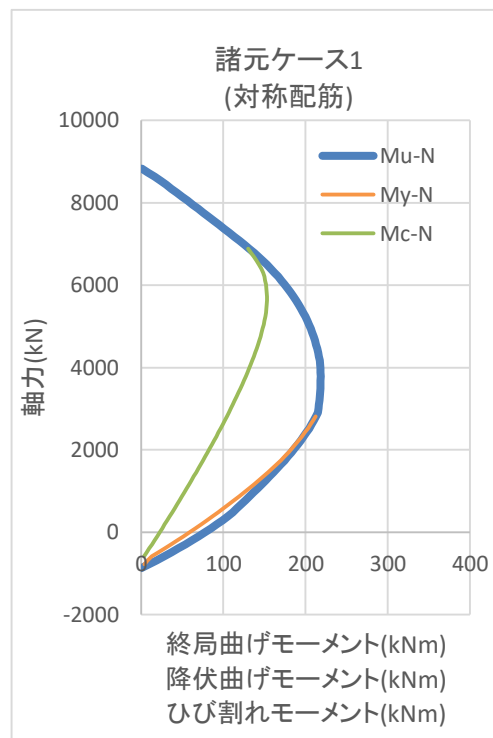
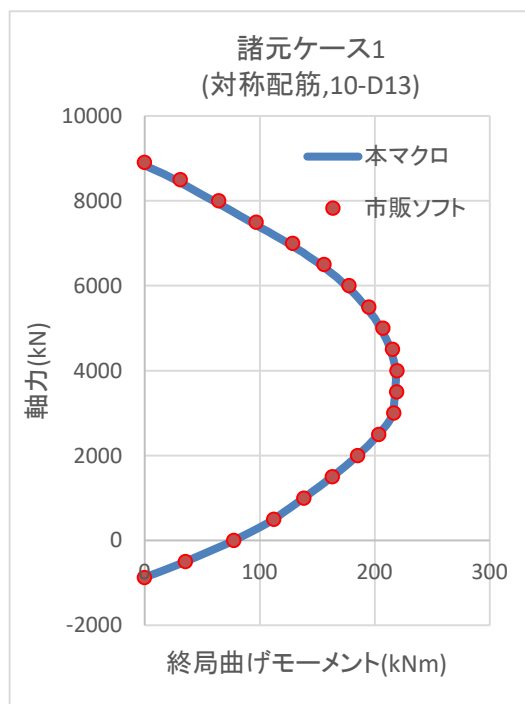
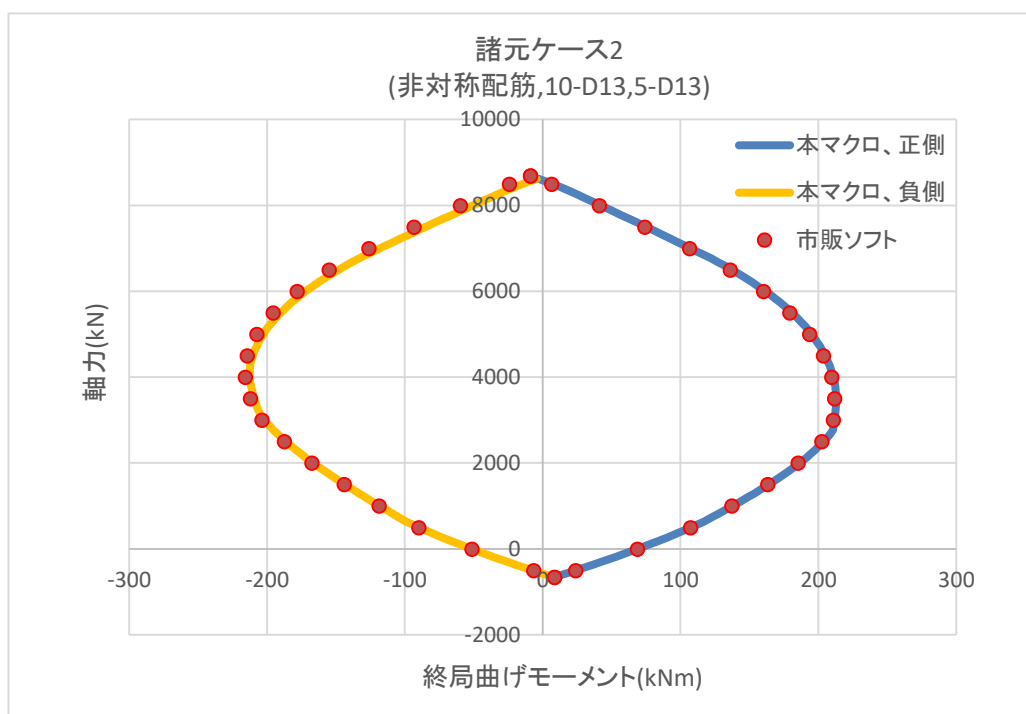


図 5.2-1 M-N 相互作用図（諸元ケース 1 :  $M_u$ -N、 $M_y$ -N および  $M_c$ -N）



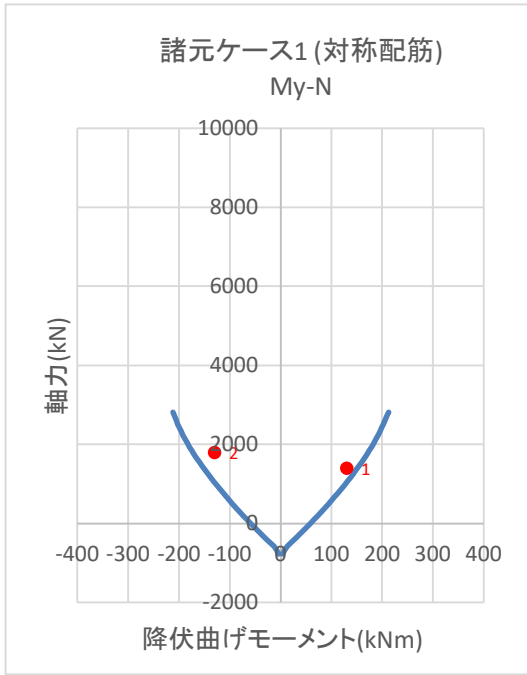
(a) 諸元ケース 1 (対称配筋)



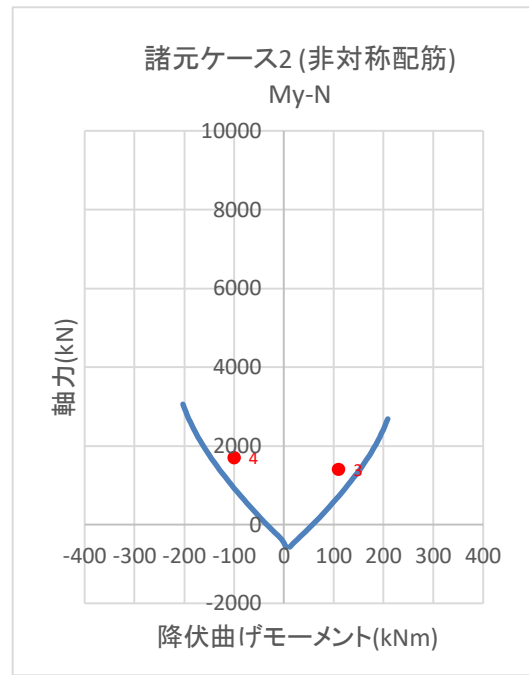
(b) 諸元ケース 2 (非対称配筋)

図 5.2-2 M-N 相互作用図 (市販ソフトとの比較 :  $M_u-N$ )

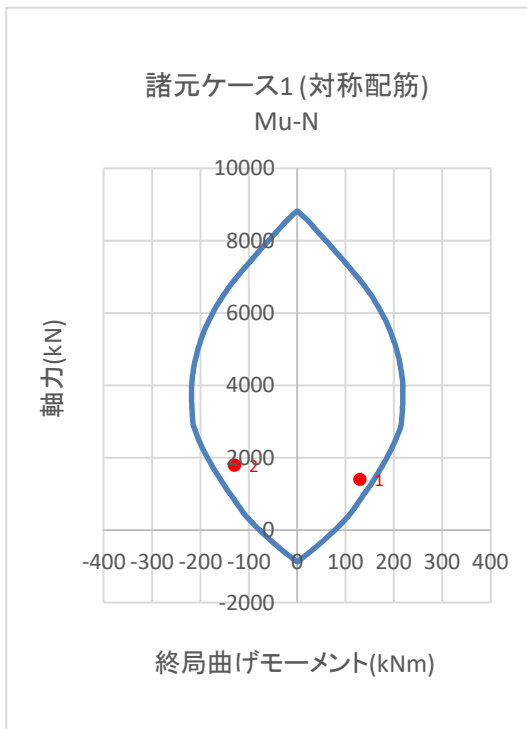




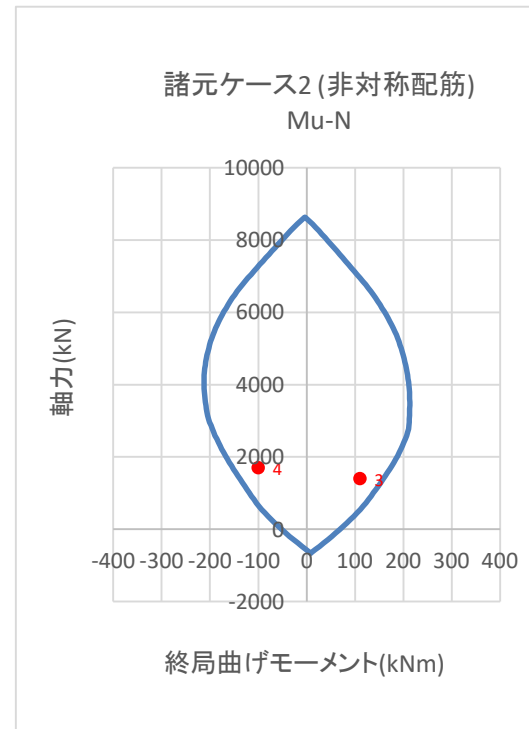
(a)My-N、諸元ケース 1



(b)My-N、諸元ケース 2



(c)Mu-N、諸元ケース 1



(d)Mu-N、諸元ケース 2

(注) 図中の赤の数字は、断面力ケースを示す

図 5.2-3 照査結果 (M-N 図へ設計断面力をプロット)