

矩形 RC 断面の二軸曲げ耐力の算出

日中構造研究所 松原勝己

1. はじめに

先に、矩形 RC 断面の M-N 相互作用図を算出するマクロを作成したが、その発展形として矩形 RC 断面が二軸曲げを受ける場合の曲げ耐力（終局曲げモーメント）を求めるマクロを作成したので、以下に入出力項目や計算手順について説明する。

一軸曲げの場合には、中立軸が断面高さ方向に直交するのに対し、二軸曲げの場合には中立軸が傾斜し、その傾斜角 α と軸力値 N に依存して、断面高さ方向および断面幅方向の終局曲げモーメント (M_x, M_y) が定められる。この M_x と M_y は双方ともが 1 つの値として決定されるのではなく、終局に達するときの M_x および M_y にある関係が存在することになる。すなわち、軸力 N を設定したとき、ある傾斜角 α に対して (M_x, M_y) の組み合わせが 1 つ決まる、また別の α に対して別の (M_x, M_y) の組み合わせが決まる、というようにである。

本報告では、二軸曲げ耐力算出にあたり、松本進（1984）「軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の弾塑性解析方法 鹿児島大学工学部研究報告 第 26 巻」（以下、松本(1984)と呼ぶ）を参照した。

なお、二軸曲げ耐力算出のエクセルファイルを掲載しているので、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。

2. 入出力データ

2.1 入力データ

2.1.1 断面諸元データ

以下に示す 29 個のデータを入力する。入力データはシート「断面諸元データ」に作成する。

(1) 諸元データ番号

諸元データ番号を、1 から順に入力する。諸元データ番号が空欄になったとき、それ以上データはないと判断し、計算を終了させる。

(2) ケース説明

各計算ケースのデータの説明を入力する。出力シート内の計算結果において、結果の識別のために使用される。

(3) 全高 h (m)

断面高さを m 単位で入力する。断面高さ方向を座標軸の Y 方向（下向きを正方向）とする。

(4) 幅 b (m)

断面幅を m 単位で入力する。断面幅方向を座標軸の X 方向（左向きを正方向）とする。

(5)鉄筋ヤング係数 e_s (kN/mm²)

鉄筋のヤング係数を kN/mm² 単位で入力する。

(6)鉄筋降伏強度 f_y (N/mm²)

鉄筋降伏強度を N/mm² 単位で入力する。

(7)コンクリートヤング係数 e_c (kN/mm²)

コンクリートのヤング係数を kN/mm² 単位で入力する。ただし、マクロ内において、この値は使用されない。空欄としてもエラーは発生しない。

(8)コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm²)

コンクリート圧縮強度を N/mm² 単位で入力する。

(9)径 or 断面積 d_{1x} (軸方向筋・第1段・X方向)

軸方向筋第1段目のX方向の配筋について、鉄筋径あるいは1本あたり断面積を入力する。鉄筋径で指定する場合は、「D13」(直径13mm鉄筋)のように入力し、断面積で指定する場合は、cm² 単位で入力する。

(10)本数 n_{1x} (軸方向筋・第1段・X方向)

軸方向筋第1段目のX方向の配筋について、鉄筋本数を入力する。

(11)はなれ s_{1x} (軸方向筋・第1段・X方向)

軸方向筋第1段目のX方向の配筋について、はなれを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のはなれとは、鉄筋列(鉄筋の並び)に平行する方向に、最も外側の鉄筋中心とコンクリート表面との距離を表している。

(12)かぶり c_{1x} (軸方向筋・第1段・X方向)

軸方向筋第1段目のX方向の配筋について、かぶりを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のかぶりとは、鉄筋列(鉄筋の並び)に直交する方向に、鉄筋列中心とコンクリート表面との距離を表している。

(13)径 or 断面積 d_{1y} (軸方向筋・第1段・Y方向)

軸方向筋第1段目のY方向の配筋について、鉄筋径あるいは1本あたり断面積を入力する。鉄筋径で指定する場合は、「D13」(直径13mm鉄筋)のように入力し、断面積で指定する場合は、cm² 単位で入力する。

(14)本数 n_{1y} (軸方向筋・第1段・Y方向)

軸方向筋第1段目のY方向の配筋について、鉄筋本数を入力する。

(15)はなれ s_{1y} (軸方向筋・第1段・Y方向)

軸方向筋第1段目のY方向の配筋について、はなれを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のはなれとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に平行する方向に、最も外側の鉄筋中心とコンクリート表面との距離を表している。

(16)かぶり $c1y$ （軸方向筋・第1段・Y方向）

軸方向筋第1段目のY方向の配筋について、かぶりを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のかぶりとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に直交する方向に、鉄筋列中心とコンクリート表面との距離を表している。

(17)径 or 断面積 $d2x$ （軸方向筋・第2段・X方向）

軸方向筋第2段目のX方向の配筋について、鉄筋径あるいは1本あたり断面積を入力する。鉄筋径で指定する場合は、「D13」（直径13mm鉄筋）のように入力し、断面積で指定する場合は、 cm^2 単位で入力する。

(18)本数 $n2x$ （軸方向筋・第2段・X方向）

軸方向筋第2段目のX方向の配筋について、鉄筋本数を入力する。

(19)はなれ $s2x$ （軸方向筋・第2段・X方向）

軸方向筋第2段目のX方向の配筋について、はなれを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のはなれとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に平行する方向に、最も外側の鉄筋中心とコンクリート表面との距離を表している。

(20)かぶり $c2x$ （軸方向筋・第2段・X方向）

軸方向筋第2段目のX方向の配筋について、かぶりを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のかぶりとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に直交する方向に、鉄筋列中心とコンクリート表面との距離を表している。

(21)径 or 断面積 $d2y$ （軸方向筋・第2段・Y方向）

軸方向筋第2段目のY方向の配筋について、鉄筋径あるいは1本あたり断面積を入力する。鉄筋径で指定する場合は、「D13」（直径13mm鉄筋）のように入力し、断面積で指定する場合は、 cm^2 単位で入力する。

(22)本数 $n2y$ （軸方向筋・第2段・Y方向）

軸方向筋第2段目のY方向の配筋について、鉄筋本数を入力する。

(23)はなれ $s2y$ （軸方向筋・第2段・Y方向）

軸方向筋第2段目のY方向の配筋について、はなれを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のはなれとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に平行する方向に、最も外側の鉄筋中心とコンクリート表面との距離を表している。

(24)かぶり $c2y$ （軸方向筋・第2段・Y方向）

軸方向筋第2段目のY方向の配筋について、かぶりを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のかぶりとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に直交する方向に、鉄筋列中心とコンクリート表面との距離を表している。

は、鉄筋列（鉄筋の並び）に直交する方向に、鉄筋列中心とコンクリート表面との距離を表している。

(25)鉄筋引張許容応力度 s_{sa}

本マクロでは、鉄筋あるいはコンクリートが許容応力度に達するときの曲げモーメント（以下、許容曲げモーメントと呼ぶ）を求めることも可能である。その際に、本データの鉄筋引張許容応力度の入力が必要となり、 N/mm^2 単位で入力する。また、許容曲げモーメントを求めるときには、後述のソースコード内のフラグ $iflag5$ を 1 に設定する必要がある。許容曲げモーメントを求めないときは、本データは空欄でもよい。

(26)コンクリート圧縮許容応力度 s_{ca}

本マクロでは、鉄筋あるいはコンクリートが許容応力度に達するときの曲げモーメント（以下、許容曲げモーメントと呼ぶ）を求めることも可能である。その際に、本データのコンクリート圧縮許容応力度の入力が必要となり、 N/mm^2 単位で入力する。また、許容曲げモーメントを求めるときには、後述のソースコード内のフラグ $iflag5$ を 1 に設定する必要がある。許容曲げモーメントを求めないときは、本データは空欄でもよい。

(27)軸力分割数 $nnd1$

終局曲げモーメントを算出する際に設定する軸力 N の分割数を入力する。最大軸力 nd_{max} と最小軸力 nd_{min} の間を $nnd1$ 個に分割して軸力を設定する。したがって、設定された軸力の数は $nnd+1 (=nnd)$ 個である。また、最大軸力とは、純圧縮軸力によって抵抗できる最大の軸力（正值）であり、コンクリート応力が圧縮強度の 0.85 倍に達したときの軸力値と、鉄筋応力が圧縮降伏に達したときの軸力値の和とした。さらに、最小軸力とは、純引張軸力によって抵抗できる最小の軸力（負値）であり、鉄筋応力が引張降伏に達したときの軸力値とした。

なお、 $nnd1$ に 0 を入力した場合、上記の軸力の設定は行わず、ユーザーが指定軸力を入力することとする。この場合、後述の(29)の指定軸力のデータを入力する必要がある。

(28)中立軸傾斜角度の分割数 $nal1$

終局曲げモーメントを算出する際に設定する中立軸傾斜角 α の分割数を入力する。 $\alpha=0^\circ$ （中立軸が断面高さ方向に直交する場合）から $\alpha=90^\circ$ （中立軸が断面高さ方向に平行する場合）までを $nal1$ 個に分割して α を設定する。したがって、設定された α の数は $nal1+1 (=nal)$ 個となる。

(29)指定軸力 $nd_dsg(i)$

(27)において $nnd1=0$ を入力した場合、本データにおいて指定軸力を kN 単位で入力する。本欄以降の右側のセルに必要な数だけ指定軸力を入力可能である。マクロ内において、空欄が生じた時点で指定軸力の入力が終了する。

2.1.2 追加配筋データ

断面諸元データでは、鉄筋の入力を 2 段配筋までとしているが、それ以上の段数の入力が必要な場合、シート「追加配筋データ」で指定する。追加配筋データを指定する場合、ソースコードにおけるフラグ

iflag3 を 1 に設定する必要がある。

入力するデータは、以下の 7 個である。

(1) 諸元データ番号

シート「断面諸元データ」の諸元データ番号に対応する番号を入力する。追加配筋データは、断面諸元データの順序と同一である必要があり、本諸元データ番号も同一順序とする。

(2) 番号

追加配筋のデータ分の番号を 1 から順に附番する。本番号が空欄になった時点でデータがないと判断し、追加配筋データの入力を中止する。

(3) 径あるいは断面積

鉄筋径を「D●」（●は鉄筋呼び径）で入力するか、鉄筋 1 本当たり断面積を cm² 単位で入力する。

(4) 本数

X 方向あるいは Y 方向配筋の鉄筋本数を入力する。なお、配筋方向については、後の(7)で指定する。

(5) はなれ

はなれを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のはなれとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に平行する方向に、最も外側の鉄筋中心とコンクリート表面との距離を表している。

(6) かぶり

かぶりを cm 単位で入力する。ここで、鉄筋のかぶりとは、鉄筋列（鉄筋の並び）に直交する方向に、鉄筋列中心とコンクリート表面との距離を表している。

(7) 配筋方向

配筋方向を「X」あるいは「Y」で入力する。「X」は断面幅方向の配筋、「Y」は断面高さ方向の配筋を意味する。

追加配筋データを指定しない場合、①ソースコード内のフラグ iflag3 を 1 以外に指定する、②追加配筋データの「本数」を 0 とする、あるいは③追加配筋データの「番号」を空欄とする、のいずれかの設定を行う。

2.2 データ入力数の制限

配列のデメンジョンの大きさの制限から、以下の通り、データ入力数の制限がある。

全鉄筋本数 na1 : 200 本以内

諸元ケース数 na2 : 10 ケース以内

計算する軸力の数 na3 : 201 個以内

計算する中立軸傾斜角の数 na4 : 201 個以内

中立軸計算時の繰り返し数 **na5** : 100 回以内
指定軸力の数 **na6** : 20 個以内
追加配筋データの数 **na7** : 20 個以内

上記の制限よりも大きいデータ数を入力するときには、ソースコード内の **na1**~**na7** の設定を変更する必要がある。

2.3 ソースコード内のフラグ

ソースコード内で指定する幾つかのフラグがある。以下に示す。

(1)iflag1

出力する終局曲げモーメント M_x 、 M_y および M_{xy} を無次元表示とするとき、**iflag1=1** を入力する。ここに、無次元表示とは、 $M'_x=M_x/(B*H^2*fc)$ 、 $M'_y=M_y/(B^2*H*fc)$ 、 $M'_{xy}=\text{Sqr}((M'_x)^2+(M'_y)^2)$ により算出されるものである。現マクロでは、デフォルトとして **iflag1=1** に設定している。

(2)iflag2

コンクリート圧縮応力の総和を求めるときに、積分計算を実行する必要がある、解析式による場合 **iflag2=1** とし、数値積分による場合 **iflag2** を 1 以外とする。現マクロでは、デフォルトとして **iflag2=1** に設定している。

(3)iflag3

追加配筋データを設定する場合、**iflag3=1** とする。現マクロでは、デフォルトとして **iflag3=1** に設定している。

(4)iflag4

降伏耐力の計算する場合、**iflag4=1** とする。現マクロでは、デフォルトとして **iflag4=1** と設定している。

(5)iflag5

iflag5 ≠ 1 のとき、終局あるいは降伏曲げモーメントを求める。また、許容曲げモーメント（鉄筋あるいはコンクリートが許容応力度に達する曲げモーメント）を求めるとき、**iflag5=1** に設定する。許容曲げモーメントの計算では、鉄筋が許容応力度に達する曲げモーメントとコンクリートが許容応力度に達する曲げモーメントをそれぞれ別に算出される。また、許容曲げモーメントと終局（降伏）曲げモーメントを、同時に計算することはできない。現マクロでは、デフォルトとして **iflag5=0** に設定している。

(6)num_icase

中立軸計算の収束状況を、シート「中立軸計算」に出力するが、収束状況を出力する諸元ケース番号を指定する。現マクロのデフォルトは、**num_icase=1**（諸元ケース 1）としている。

2.4 出力データ

出力データは、以下 11 個のシートに出力される。

(1)鉄筋位置座標

鉄筋位置の座標値、鉄筋の断面積、および断面の 4 隅の座標値を出力するシートである。
配筋および断面形状が正しく入力されているかどうか、チェックに使用する。

(2)中立軸計算 U

ソースコード内のフラグ `num_icode` で指定した諸元ケースについて、終局耐力に対する中立軸計算の収束状況を出力する。出力項目は、中立軸傾斜角 α のステップ数、収束回数および収束に至るまでの中立軸位置 x （最外縁圧縮縁から中立軸までの距離）である。

(3)中立軸計算 Y

ソースコード内のフラグ `num_icode` で指定した諸元ケースについて、降伏耐力に対する中立軸計算の収束状況を出力する。出力項目は、中立軸傾斜角 α のステップ数、収束回数および収束に至るまでの中立軸位置 x （最外縁圧縮縁から中立軸までの距離）である。

(4)中立軸計算 AC

ソースコード内のフラグ `num_icode` で指定した諸元ケースについて、コンクリートが許容応力度に達する中立軸計算の収束状況を出力する。出力項目は、中立軸傾斜角 α のステップ数、収束回数および収束に至るまでの中立軸位置 x （最外縁圧縮縁から中立軸までの距離）である。

(5)中立軸計算 AS

ソースコード内のフラグ `num_icode` で指定した諸元ケースについて、鉄筋が許容応力度に達する中立軸計算の収束状況を出力する。出力項目は、中立軸傾斜角 α のステップ数、収束回数および収束に至るまでの中立軸位置 x （最外縁圧縮縁から中立軸までの距離）である。

(6)M-N 関係 U(●a)

軸力 N を固定したとき、中立軸傾斜角 α の変化に伴う終局曲げモーメントを出力する。ここに、●は諸元ケース番号を示す。したがって、諸元ケースごとに出力するシートが異なる。

出力項目は、軸力値 $N(\text{kN})$ 、中立軸傾斜角 $\alpha(\text{deg})$ 、中立軸ケース CASE 、中立軸位置 $X(\text{cm})$ 、 X 方向終局曲げモーメント $M_x(\text{kNm})$ 、 Y 方向終局曲げモーメント $M_y(\text{kNm})$ 、終局時合モーメント $M_{xy}(\text{kNm})$ 、モーメント方向角 $\theta(\text{deg})$ 、引張鉄筋の降伏判定 id_y 、圧縮鉄筋の降伏判定 id_y2 、釣合軸力 $N_b(\text{kN})$ 、 X 方向釣合曲げモーメント $M_{xb}(\text{kNm})$ 、および Y 方向釣合モーメント $M_{yb}(\text{kNm})$ である。

ここに、中立軸ケースとは、松本(1984)に従い、中立軸の位置と傾斜角により分類したものである。中立軸の X 切片および Y 切片の位置が断面内にあるかどうかにより、5 つの CASE に分類している。詳細については、後述する。終局時合モーメントは、 $M_{xy}=\text{Sqr}(M_x^2+M_y^2)$ で算出される。モーメント方向角は、終局時合モーメントの方向を示す角度で、 $\theta=\text{tan}^{-1}(M_y/M_x)$ で算出している。

なお、現マクロにおける M-N 関係 U(●a)の出力シートは、諸元ケース 8 個分を用意しているが、諸

元ケースが 8 個を超える場合には、出力シートをユーザーが準備するのが望ましい。必要な出力シートが無い場合、マクロにより自動作成されるが、ユーザーが望まない位置にシートが作成される可能性がある。これは、他の M-N 関係のシートについても同様である。

(7)M-N 関係 U(●b)

中立軸傾斜角 α を固定したとき、軸力値 N の変化に伴う終局曲げモーメントを出力する。ここに、●は諸元ケース番号を示す。したがって、諸元ケースごとに出力するシートが異なる。

出力項目は、中立軸傾斜角 α (deg)、軸力値 N (kN)、中立軸ケース CASE、中立軸位置 X (cm)、 X 方向終局曲げモーメント M_x (kNm)、 Y 方向終局曲げモーメント M_y (kNm)、終局時合モーメント M_{xy} (kNm)、モーメント方向角 θ (deg)、引張鉄筋の降伏判定 idy 、圧縮鉄筋の降伏判定 $idy2$ 、釣合軸力 N_b (kN)、 X 方向釣合曲げモーメント M_{xb} (kNm)、および Y 方向釣合曲げモーメント M_{yb} (kNm) である。

ここに、中立軸ケースとは、松本(1984)に従い、中立軸の位置と傾斜角により分類したものである。中立軸の X 切片および Y 切片の位置が断面内にあるかどうかにより、5 つの CASE に分類している。詳細については、後述する。終局時合モーメントは、 $M_{xy}=\text{Sqr}(M_x^2+M_y^2)$ で算出される。モーメント方向角は、終局時合モーメントの方向を示す角度で、 $\theta=\tan^{-1}(M_y/M_x)$ で算出している。

(8) M-N 関係 Y(●a)

軸力 N を固定したとき、中立軸傾斜角 α の変化に伴う降伏曲げモーメントを出力する。ここに、●は諸元ケース番号を示す。したがって、諸元ケースごとに出力するシートが異なる。

出力項目は、軸力値 N (kN)、中立軸傾斜角 α (deg)、中立軸ケース CASE、中立軸位置 X (cm)、 X 方向降伏曲げモーメント M_x (kNm)、 Y 方向降伏曲げモーメント M_y (kNm)、降伏時合モーメント M_{xy} (kNm)、およびモーメント方向角 θ (deg) である。

(9)M-N 関係 Y(●b)

中立軸傾斜角 α を固定したとき、軸力値 N の変化に伴う降伏曲げモーメントを出力する。ここに、●は諸元ケース番号を示す。したがって、諸元ケースごとに出力するシートが異なる。

出力項目は、軸力値 N (kN)、中立軸傾斜角 α (deg)、中立軸ケース CASE、中立軸位置 X (cm)、 X 方向降伏曲げモーメント M_x (kNm)、 Y 方向降伏曲げモーメント M_y (kNm)、降伏時合モーメント M_{xy} (kNm)、およびモーメント方向角 θ (deg) である。

(10)M-N 関係 A(●a)

軸力 N を固定したとき、中立軸傾斜角 α の変化に伴う許容曲げモーメントを出力する。ここに、●は諸元ケース番号を示す。したがって、諸元ケースごとに出力するシートが異なる。

出力項目は、コンクリートが許容応力度に達する場合には、軸力値 N (kN)、中立軸傾斜角 α (deg)、中立軸ケース CASE、中立軸位置 X (cm)、 X 方向許容曲げモーメント M_x (kNm)、 Y 方向許容曲げモーメント M_y (kNm)、許容時合モーメント M_{xy} (kNm)、モーメント方向角 θ (deg)、引張鉄筋の許容超過判定 idy 、圧縮鉄筋の許容超過判定 $idy2$ 、釣合軸力 N_b (kN)、 X 方向釣合曲げモーメント M_{xb} (kNm)、および Y 方向釣合モーメント M_{yb} (kNm) である。また、鉄筋が許容応力度に達する場合には、軸力値 N (kN)、中立軸傾斜角 α (deg)、中立軸ケース CASE、中立軸位置 X (cm)、 X 方向許容曲げモーメント M_x (kNm)、 Y 方向許容曲げモーメント M_y (kNm)、許容時合モーメント M_{xy} (kNm)、モーメント方向角 θ (deg) であ

る。

ここに、中立軸ケースとは、松本(1984)に従い、中立軸の位置と傾斜角により分類したものである。中立軸の X 切片および Y 切片の位置が断面内にあるかどうかにより、5 つの CASE に分類している。詳細については、後述する。許容時合モーメントは、 $M_{xy}=\text{Sqr}(M_x^2+M_y^2)$ で算出される。モーメント方向角は、許容時合モーメントの方向を示す角度で、 $\theta=\tan^{-1}(M_y/M_x)$ で算出している。

(11)M-N 関係 A(●b)

中立軸傾斜角 α を固定したとき、軸力 N の変化に伴う許容曲げモーメントを出力する。ここに、●は諸元ケース番号を示す。したがって、諸元ケースごとに出力するシートが異なる。

出力項目は、コンクリートが許容応力度に達する場合には、中立軸傾斜角 α (deg)、軸力値 N(kN)、中立軸ケース CASE、中立軸位置 X(cm)、X 方向許容曲げモーメント M_x (kNm)、Y 方向許容曲げモーメント M_y (kNm)、許容時合モーメント M_{xy} (kNm)、モーメント方向角 θ (deg)、引張鉄筋の許容超過判定 idy 、圧縮鉄筋の許容超過判定 $idy2$ 、釣合軸力 N_b (kN)、X 方向釣合曲げモーメント M_{xb} (kNm)、および Y 方向釣合モーメント M_{yb} (kNm) である。また、鉄筋が許容応力度に達する場合には、軸力値 N(kN)、中立軸傾斜角 α (deg)、中立軸ケース CASE、中立軸位置 X(cm)、X 方向許容曲げモーメント M_x (kNm)、Y 方向許容曲げモーメント M_y (kNm)、許容時合モーメント M_{xy} (kNm)、モーメント方向角 θ (deg)である。

ここに、中立軸ケースとは、松本(1984)に従い、中立軸の位置と傾斜角により分類したものである。中立軸の X 切片および Y 切片の位置が断面内にあるかどうかにより、5 つの CASE に分類している。詳細については、後述する。許容時合モーメントは、 $M_{xy}=\text{Sqr}(M_x^2+M_y^2)$ で算出される。モーメント方向角は、許容時合モーメントの方向を示す角度で、 $\theta=\tan^{-1}(M_y/M_x)$ で算出している。

2.5 入出力例

図 2.5-1~10 に、入出力データ例を示す。

図 2.5-1 シート「断面諸元データ」

図 2.5-2 シート「追加配筋データ」

図 2.5-3 シート「鉄筋位置座標」(一部)

図 2.5-4 シート「中立軸計算 U」(一部)

図 2.5-5 シート「M-N 関係 U(5a)」(一部)

図 2.5-6 シート「M-N 関係 U(5b)」(一部)

図 2.5-7 シート「M-N 関係 Y(5a)」(一部)

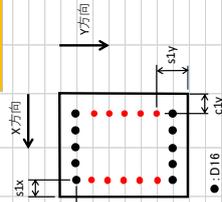
図 2.5-8 シート「M-N 関係 Y(5b)」(一部)

図 2.5-9 シート「M-N 関係 A(5a)」(一部)

図 2.5-10 シート「M-N 関係 A(5b)」(一部)

番号	ケース説明	全高 h (m) [Y方向]	幅 b (m) [X方向]	鉄筋 ヤング 係数 es (kN/mm ²)	鉄筋 降伏 強度 fy (N/mm ²)	コンクリート ヤング 係数 ec (kN/mm ²)	コンクリート 圧縮 強度 fc (N/mm ²)	軸方向筋・第1段・X方向		軸方向筋・第1段・Y方向		軸方向筋・第2段・X方向		軸方向筋・第2段・Y方向		中立軸 傾斜角度 の分割数 nall	以降、 指定軸力 nd.deg() (kN)	これより 以降 のカラム も使用	備考 *備考の1つ目の欄を 空欄とすること
								径(D) or 断面積 (cm ²) d1x	はなれ s1x (cm) n1x	かぶり c1x (cm) n1y	本数 n1y	はなれ s1y (cm) n1y	径(D) or 断面積 (cm ²) d1y	はなれ s2x(m) e2x(m) n2x	本数 n2x				
1	No.1零軸力	0.22	0.22	180	378	28	30	4.84	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	No.1ゼロ軸力
2	No.2零軸力	0.22	0.22	180	378	28	30	2.42	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	No.2ゼロ軸力
3	No.3零軸力	0.22	0.22	180	378	28	30	1.61	4	2	2	1.61	2	8	2	0	0	0	No.3ゼロ軸力
4	No.4零軸力	0.22	0.22	180	378	28	30	0.807	7	2	2	0.807	5	5	2	0	0	0	No.4ゼロ軸力
5	No.1	0.22	0.22	180	378	28	30	4.84	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	No.1
6	No.2	0.22	0.22	180	378	28	30	2.42	3	2	2	2.42	1	11	2	0	0	0	No.2
7	No.3	0.22	0.22	180	378	28	30	1.61	4	2	2	1.61	2	8	2	0	0	0	No.3
8	No.4	0.22	0.22	180	378	28	30	0.807	7	2	2	0.807	5	5	2	0	0	0	No.4

配筋データ例



・X方向、Y方向ともに、対称配筋を前提とする。
 ・左図の配筋の場合、D16がX方向配筋、D13がY方向配筋となる。
 ・軸方向筋・第1段・X方向には、径d1x="D16"、本数n1x=5、はなれs1x、かぶりc1xを入力する。
 ・軸方向筋・第1段・Y方向には、径d1y="D13"、本数n1y=5、はなれs1y、かぶりc1yを入力する。

図 2.5-1 シート「断面諸元データ」

ケース5 No.1								ケース5 No.1								
1	曲力(無次元)	-0.5035						2	曲力(無次元)	-0.48493						
番号	α (deg)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ (deg)	番号	α (deg)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ (deg)	
1	0	0	999	0	0	0	0	1	0	0	-217.918	0.007799	0	0.007799	0	
2	1	1	999	0	0	0	39.43304	2	1	1	-221.688	0.007666	0.000134	0.007667	1	
3	2	1	999	0	0	0	41.23425	3	2	1	-225.391	0.007536	0.000263	0.007541	2	
4	3	1	999	0	0	0	42.01594	4	3	1	-229.024	0.007411	0.000388	0.007421	3	
5	4	1	999	0	0	0	42.48123	5	4	1	-232.587	0.00729	0.00051	0.007308	4	
6	5	1	999	0	0	0	42.80051	6	5	1	-236.082	0.007172	0.000627	0.007199	5	
7	6	1	999	0	0	0	43.03836	7	6	1	-239.503	0.007058	0.000742	0.007077	6	
8	7	1	999	0	0	0	43.22532	8	7	1	-242.851	0.006947	0.000853	0.006999	7	
9	8	1	999	0	0	0	43.37795	9	8	1	-246.125	0.006838	0.000961	0.006906	8	
10	9	1	999	0	0	0	43.50615	10	9	1	-249.325	0.006733	0.001066	0.006817	9	
11	10	1	999	0	0	0	43.61619	11	10	1	-252.447	0.00663	0.001169	0.006733	10	
12	11	1	999	0	0	0	43.71234	12	11	1	-255.495	0.00653	0.001269	0.006652	11	
13	12	1	999	0	0	0	43.79755	13	12	1	-258.463	0.006432	0.001367	0.006576	12	
14	13	1	999	0	0	0	43.87398	14	13	1	-261.354	0.006337	0.001463	0.006503	13	
15	14	1	999	0	0	0	43.94322	15	14	1	-264.164	0.006243	0.001557	0.006434	14	
16	15	1	999	0	0	0	44.00652	16	15	1	-266.894	0.006151	0.001648	0.006368	15	
17	16	1	999	0	0	0	44.06481	17	16	1	-269.542	0.006061	0.001738	0.006306	16	
18	17	1	999	0	0	0	44.11886	18	17	1	-272.109	0.005973	0.001826	0.006246	17	
19	18	1	999	0	0	0	44.16927	19	18	1	-274.593	0.005887	0.001913	0.00619	18	
20	19	1	999	0	0	0	44.21654	20	19	1	-276.993	0.005802	0.001998	0.006136	19	
21	20	1	999	0	0	0	44.26107	21	20	1	-279.308	0.005718	0.002081	0.006085	20	
22	21	1	999	0	0	0	44.3032	22	21	1	-281.538	0.005636	0.002163	0.006037	21	
23	22	1	999	0	0	0	44.34323	23	22	1	-283.683	0.005555	0.002244	0.005991	22	
24	23	1	999	0	0	0	44.3814	24	23	1	-285.741	0.005475	0.002324	0.005948	23	
25	24	1	999	0	0	0	44.41791	25	24	1	-287.713	0.005397	0.002403	0.005907	24	
26	25	1	999	0	0	0	44.45296	26	25	1	-289.597	0.005319	0.00248	0.005869	25	
27	26	1	999	0	0	0	44.48668	27	26	1	-291.392	0.005243	0.002557	0.005833	26	

図 2.5-7 シート「M-N 関係 Y(5a)」(一部)

ケース5 No.1								ケース5 No.1								
1	α (deg)	0						2	α (deg)	1						
番号	曲力(無次元)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ (deg)	番号	曲力(無次元)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ (deg)	
1	-0.5035	0	999	0	0	0	0	1	-0.5035	1	999	0	0	0	39.43304	
2	-0.48493	0	-217.918	0.007799	0	0.007799	0	2	-0.48493	1	-221.688	0.007666	0.000134	0.007667	1	
3	-0.46637	0	-100.552	0.015393	0	0.015393	0	3	-0.46637	1	-102.292	0.015129	0.000264	0.015131	1	
4	-0.44781	0	-60.7288	0.022986	0	0.022986	0	4	-0.44781	1	-61.779	0.022592	0.000394	0.022595	1	
5	-0.42925	0	-40.6826	0.030579	0	0.030579	0	5	-0.42925	1	-41.3863	0.030055	0.000525	0.030059	1	
6	-0.41069	0	-28.6116	0.038173	0	0.038173	0	6	-0.41069	1	-29.1065	0.037518	0.000655	0.037524	1	
7	-0.39213	0	-20.5462	0.045766	0	0.045766	0	7	-0.39213	1	-20.9016	0.044981	0.000785	0.044988	1	
8	-0.37357	0	-14.7762	0.053359	0	0.053359	0	8	-0.37357	1	-15.0318	0.052444	0.000915	0.052452	1	
9	-0.355	0	-10.4439	0.060953	0	0.060953	0	9	-0.355	1	-10.6246	0.059907	0.001046	0.059916	1	
10	-0.33644	0	-7.0714	0.068546	0	0.068546	0	10	-0.33644	1	-7.19375	0.06737	0.001176	0.06738	1	
11	-0.31788	0	-4.37161	0.076139	0	0.076139	0	11	-0.31788	1	-4.44724	0.074833	0.001306	0.074844	1	
12	-0.29932	0	-2.16147	0.083733	0	0.083733	0	12	-0.29932	1	-2.19886	0.082296	0.001436	0.082309	1	
13	-0.28076	0	-0.31884	0.091326	0	0.091326	0	13	-0.28076	1	-0.32436	0.089759	0.001567	0.089773	1	
14	-0.2622	0	1.057075	0.099095	0	0.099095	0	14	-0.2622	2	1.118711	0.097373	0.001806	0.09739	1.06273	
15	-0.24364	0	1.986878	0.10703	0	0.10703	0	15	-0.24364	2	2.08367	0.105214	0.002028	0.105233	1.104041	
16	-0.22507	0	2.720475	0.114912	0	0.114912	0	16	-0.22507	2	2.836895	0.113027	0.002211	0.113049	1.120512	
17	-0.20651	0	3.338744	0.122693	0	0.122693	0	17	-0.20651	2	3.46845	0.120749	0.002371	0.120773	1.12513	
18	-0.18795	0	3.879016	0.13036	0	0.13036	0	18	-0.18795	2	4.018595	0.128363	0.002517	0.128387	1.123387	
19	-0.16939	0	4.362149	0.137912	0	0.137912	0	19	-0.16939	2	4.509554	0.135864	0.002652	0.13589	1.118039	
20	-0.15083	0	4.801221	0.145349	0	0.145349	0	20	-0.15083	2	4.955103	0.143253	0.002777	0.14328	1.110605	
21	-0.13227	0	5.205061	0.152677	0	0.152677	0	21	-0.13227	2	5.364405	0.150533	0.002896	0.15056	1.101978	
22	-0.11371	0	5.579934	0.159896	0	0.159896	0	22	-0.11371	2	5.74406	0.157706	0.003008	0.157735	1.092695	
23	-0.09514	0	5.93061	0.167014	0	0.167014	0	23	-0.09514	2	6.098841	0.164776	0.003115	0.164805	1.083097	
24	-0.07658	0	6.260559	0.174031	0	0.174031	0	24	-0.07658	2	6.43255	0.171747	0.003218	0.171777	1.073394	
25	-0.05802	0	6.572686	0.180951	0	0.180951	0	25	-0.05802	2	6.74804	0.17862	0.003317	0.178651	1.063723	
26	-0.03946	0	6.869239	0.187776	0	0.187776	0	26	-0.03946	2	7.047615	0.185398	0.003411	0.18543	1.054169	
27	-0.0209	0	7.152083	0.19451	0	0.19451	0	27	-0.0209	2	7.333306	0.192086	0.003503	0.192118	1.044782	

図 2.5-8 シート「M-N 関係 Y(5b)」(一部)

ケース5 No.1 コン圧縮											ケース5 No.1 鉄筋引張										
1	α(deg)	0									1	α(deg)	0								
番号	力(無次元)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ(deg)	idy(引張)	idy2(圧縮)	Nb(無次元)	Mxb(無次元)	Myb(無次元)	Nb	α(deg)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ(deg)	
1	0	0	1.655757	0.100288	0	0.100288	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	1	0	0	999	0	0	0	0	
2	1	2	1.834884	0.10019	0.00433	0.100283	2.474476	引張許容超	許容未滿	0.029618	0.114	0.002042	2	1	2	999	0	0	0	2.474476	
3	2	2	2.012063	0.100111	0.007888	0.100421	4.505312	引張許容超	許容未滿	0.027875	0.111926	0.004014	3	2	2	999	0	0	0	4.505312	
4	3	2	2.187187	0.100046	0.010871	0.100634	6.201385	引張許容超	許容未滿	0.026212	0.109921	0.005918	4	3	2	999	0	0	0	6.201385	
5	4	2	2.360199	0.099991	0.013412	0.100887	7.639532	引張許容超	許容未滿	0.024623	0.107981	0.00776	5	4	2	999	0	0	0	7.639532	
6	5	2	2.531048	0.099946	0.015607	0.101157	8.875121	引張許容超	許容未滿	0.023104	0.1061	0.009543	6	5	2	999	0	0	0	8.875121	
7	6	2	2.699661	0.099909	0.017525	0.101434	9.949007	引張許容超	許容未滿	0.021652	0.104276	0.011271	7	6	2	999	0	0	0	9.949007	
8	7	2	2.865959	0.099877	0.019219	0.101711	10.89189	引張許容超	許容未滿	0.020262	0.102506	0.012948	8	7	2	999	0	0	0	10.89189	
9	8	1	3.029898	0.099852	0.020728	0.101981	11.72706	引張許容超	許容未滿	0.018931	0.100786	0.014576	9	8	1	999	0	0	0	11.72706	
10	9	1	3.191449	0.099831	0.022084	0.102244	12.47371	引張許容超	許容未滿	0.017657	0.099112	0.016159	10	9	1	999	0	0	0	12.47371	
11	10	1	3.35085	0.099813	0.023315	0.1025	13.14792	引張許容超	許容未滿	0.016437	0.097484	0.017698	11	10	1	999	0	0	0	13.14792	
12	11	1	3.508206	0.099797	0.024443	0.102746	13.76216	引張許容超	許容未滿	0.015268	0.095897	0.019197	12	11	1	999	0	0	0	13.76216	
13	12	1	3.663621	0.099782	0.025482	0.102985	14.32569	引張許容超	許容未滿	0.014147	0.094341	0.020658	13	12	1	999	0	0	0	14.32569	
14	13	1	3.817121	0.099769	0.026446	0.103214	14.84597	引張許容超	許容未滿	0.013074	0.092842	0.022082	14	13	1	999	0	0	0	14.84597	
15	14	1	3.968733	0.099756	0.027344	0.103436	15.32894	引張許容超	許容未滿	0.012045	0.091388	0.023473	15	14	1	999	0	0	0	15.32894	
16	15	1	4.118457	0.099743	0.028186	0.103649	15.77948	引張許容超	許容未滿	0.01106	0.089928	0.024831	16	15	1	999	0	0	0	15.77948	
17	16	1	4.266293	0.099731	0.028978	0.103855	16.20162	引張許容超	許容未滿	0.010115	0.088521	0.026158	17	16	1	999	0	0	0	16.20162	
18	17	1	4.412187	0.099718	0.029725	0.104054	16.59893	引張許容超	許容未滿	0.009211	0.087143	0.027457	18	17	1	999	0	0	0	16.59893	
19	18	1	4.556141	0.099705	0.030434	0.104246	16.97421	引張許容超	許容未滿	0.008346	0.085795	0.028729	19	18	1	999	0	0	0	16.97421	
20	19	1	4.698129	0.099691	0.031108	0.104432	17.32994	引張許容超	許容未滿	0.007518	0.084473	0.029974	20	19	1	999	0	0	0	17.32994	
21	20	1	4.838123	0.099677	0.03175	0.104612	17.66824	引張許容超	許容未滿	0.006727	0.083178	0.031195	21	20	1	999	0	0	0	17.66824	
22	21	1	4.976907	0.099663	0.032365	0.104787	17.99094	引張許容超	許容未滿	0.005971	0.081908	0.032393	22	21	1	999	0	0	0	17.99094	
23	22	1	5.111974	0.099648	0.032955	0.104956	18.29987	引張許容超	許容未滿	0.005249	0.080661	0.033569	23	22	1	999	0	0	0	18.29987	
24	23	1	5.245739	0.099632	0.033523	0.105121	18.59636	引張許容超	許容未滿	0.004562	0.079437	0.034724	24	23	1	999	0	0	0	18.59636	
25	24	1	5.377393	0.099616	0.03407	0.105281	18.88152	引張許容超	許容未滿	0.003908	0.078234	0.035859	25	24	1	999	0	0	0	18.88152	
26	25	1	5.506792	0.099598	0.0346	0.105437	19.15692	引張許容超	許容未滿	0.003286	0.077052	0.036975	26	25	1	999	0	0	0	19.15692	
27	26	1	5.63404	0.09958	0.035113	0.105589	19.42297	引張許容超	許容未滿	0.002697	0.07589	0.038073	27	26	1	999	0	0	0	19.42297	

図 2.5-9 シート「M-N 関係 A(5a)」(一部)

ケース5 No.1 コン圧縮											ケース5 No.1 鉄筋引張										
1	α(deg)	0									1	α(deg)	0								
番号	力(無次元)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ(deg)	idy(引張)	idy2(圧縮)	Nb(無次元)	Mxb(無次元)	Myb(無次元)	Nb	α(deg)	CASE	X(cm)	Mx(無次元)	My(無次元)	Mxy(無次元)	θ(deg)	
1	-0.26107	0	1.655757	0.100288	0	0.100288	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	1	-0.26107	0	999	0	0	0	0	
2	-0.25219	0	1.761841	0.103957	0	0.103957	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	2	-0.25219	0	-237.167	0.003741	0	0.003741	0	
3	-0.2433	0	1.880723	0.107627	0	0.107627	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	3	-0.2433	0	-110.447	0.007376	0	0.007376	0	
4	-0.23442	0	2.014528	0.111297	0	0.111297	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	4	-0.23442	0	-67.3872	0.011011	0	0.011011	0	
5	-0.22553	0	2.165734	0.114966	0	0.114966	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	5	-0.22553	0	-45.7002	0.014645	0	0.014645	0	
6	-0.21665	0	2.337264	0.118633	0	0.118633	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	6	-0.21665	0	-32.6368	0.01828	0	0.01828	0	
7	-0.20777	0	2.532529	0.122296	0	0.122296	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	7	-0.20777	0	-23.9069	0.021914	0	0.021914	0	
8	-0.19888	0	2.755417	0.12595	0	0.12595	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	8	-0.19888	0	-17.6607	0.025549	0	0.025549	0	
9	-0.19	0	3.010307	0.129592	0	0.129592	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	9	-0.19	0	-12.9704	0.029183	0	0.029183	0	
10	-0.18111	0	3.301913	0.133215	0	0.133215	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	10	-0.18111	0	-9.31891	0.032818	0	0.032818	0	
11	-0.17223	0	3.635139	0.136811	0	0.136811	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	11	-0.17223	0	-6.3956	0.036452	0	0.036452	0	
12	-0.16334	0	4.014681	0.140366	0	0.140366	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	12	-0.16334	0	-4.0024	0.040087	0	0.040087	0	
13	-0.15446	0	4.444655	0.143867	0	0.143867	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	13	-0.15446	0	-2.00709	0.043721	0	0.043721	0	
14	-0.14557	0	4.928104	0.147296	0	0.147296	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	14	-0.14557	0	-0.31806	0.047356	0	0.047356	0	
15	-0.13669	0	5.466561	0.150631	0	0.150631	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	15	-0.13669	0	1.043674	0.051033	0	0.051033	0	
16	-0.12781	0	6.059897	0.153952	0	0.153952	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	16	-0.12781	0	2.068502	0.054766	0	0.054766	0	
17	-0.11892	0	6.196271	0.151694	0	0.151694	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	17	-0.11892	0	2.900001	0.058488	0	0.058488	0	
18	-0.11004	0	6.323048	0.149401	0	0.149401	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	18	-0.11004	0	3.604397	0.062179	0	0.062179	0	
19	-0.10115	0	6.454387	0.147129	0	0.147129	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	19	-0.10115	0	4.217437	0.06583	0	0.06583	0	
20	-0.09227	0	6.590604	0.144879	0	0.144879	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	20	-0.09227	0	4.761026	0.06944	0	0.06944	0	
21	-0.08338	0	6.73191	0.14265	0	0.14265	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	21	-0.08338	0	5.249725	0.073008	0	0.073008	0	
22	-0.0745	0	6.878513	0.140445	0	0.140445	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	22	-0.0745	0	5.693719	0.076536	0	0.076536	0	
23	-0.06561	0	7.030728	0.138262	0	0.138262	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	23	-0.06561	0	6.100492	0.080027	0	0.080027	0	
24	-0.05673	0	7.188765	0.136104	0	0.136104	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	24	-0.05673	0	6.475735	0.08348	0	0.08348	0	
25	-0.04785	0	7.35294	0.133971	0	0.133971	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	25	-0.04785	0	6.823835	0.086899	0	0.086899	0	
26	-0.03896	0	7.523513	0.131864	0	0.131864	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	26	-0.03896	0	7.148409	0.090286	0	0.090286	0	
27	-0.03008	0	7.700853	0.129782	0	0.129782	0	引張許容超	許容未滿	0.031444	0.116147	0	27	-0.03008	0	7.452256	0.093641	0	0.093641	0	

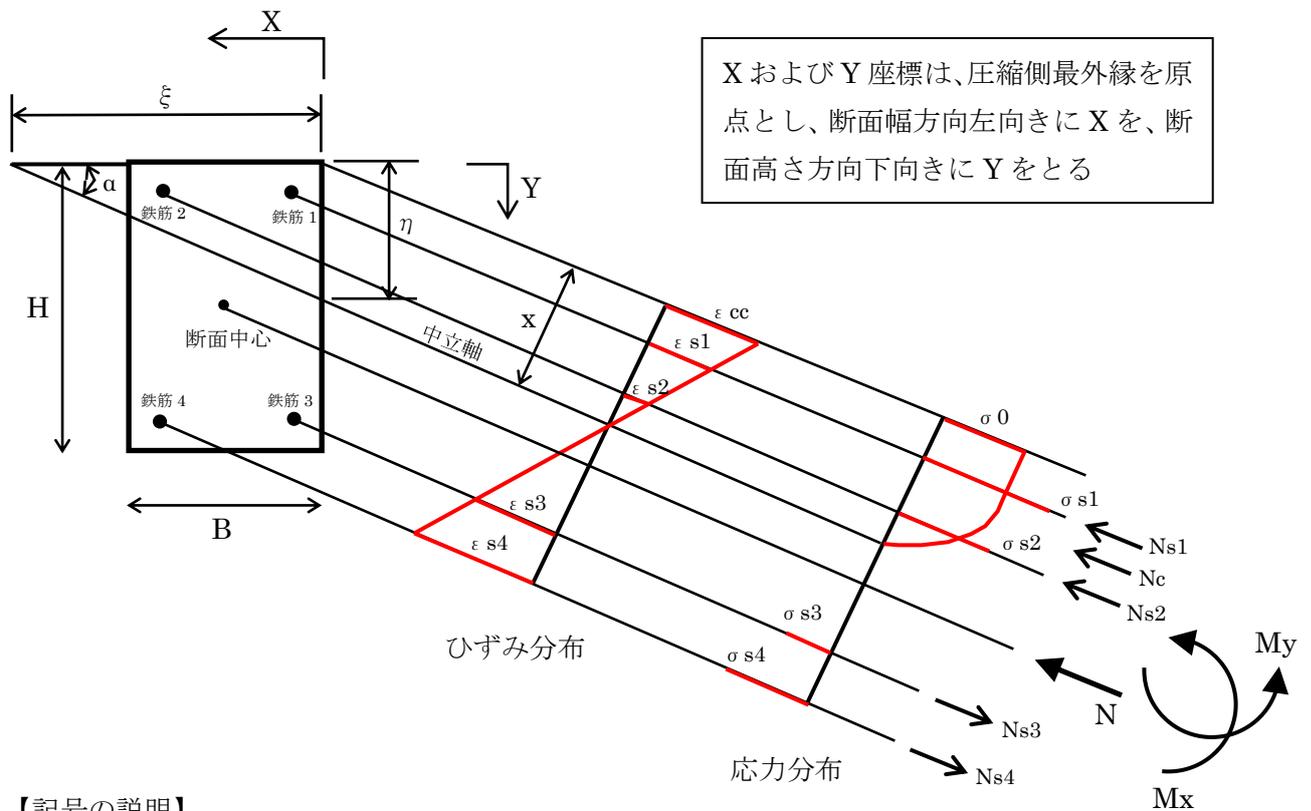
図 2.5-10 シート「M-N 関係 A(5b)」(一部)

3. 終局曲げモーメント算出の定式

3.1 断面仮定

図 3.1-1 に、二軸曲げに対する断面仮定を示す。以下の条件を仮定した。

- (1) ひずみの直線分布を仮定する。
- (2) コンクリート引張応力は無視する。
- (3) コンクリートの応力ひずみ関係は、コンクリート標準示方書に従い、放物線と直線の組合せとする。
- (4) 軸力は、断面中心に作用すると仮定する。



【記号の説明】

H : 断面高さ、B : 断面幅

ξ : 中立軸の X 切片、 η : 中立軸の Y 切片

α : 中立軸の傾斜角、 x : 圧縮側最外縁から中立軸までの距離

ε_{cc} : 圧縮側最外縁のコンクリートひずみ

$\varepsilon_{s1} \sim \varepsilon_{s4}$: 4つの鉄筋位置におけるひずみ (圧縮正)

$\sigma_{s1} \sim \sigma_{s4}$: 4つの鉄筋の応力値 (圧縮正)

σ_0 : 圧縮側最外縁のコンクリート応力 (終局時において塑性後応力値 $k_1 \cdot f'_c$)

$N_{s1} \sim N_{s4}$: 4つの鉄筋の軸方向力 (圧縮正)、 N_c : コンクリート圧縮応力の合力値

N : 軸力 (圧縮正)、 M_x : 断面中心に関する X 軸周りの曲げモーメント

M_y : 断面中心に関する Y 軸周りの曲げモーメント

図 3.1-1 二軸曲げに対する断面仮定

3.2 断面内任意点のひずみ

後に鉄筋やコンクリートのひずみを求める便宜のため、圧縮側最外縁ひずみ ε_{cc} により断面内任意点のひずみを算出する式を誘導する。

図 3.2-1 において、ひずみは OQ 方向に線形的に変化するので、点 (x_i, y_i) のひずみは、点 P におけるひずみを求めればよい。

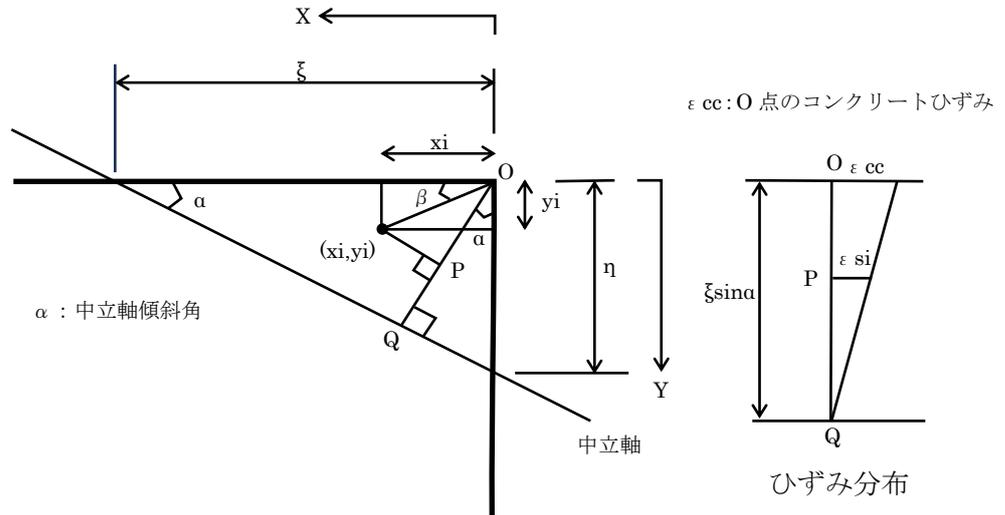


図 3.2-1 断面内任意点 (x_i, y_i) のひずみ

図 3.2-1 を参照し、断面内任意点の座標を (x_i, y_i) としたとき、角度 β は次式で表される。

$$\sin\beta = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad \cos\beta = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad 3.2(1)$$

また、 OQ および OP は、次式で表される。

$$OQ = \xi \sin\alpha \quad OP = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos\{\pi/2 - (\alpha + \beta)\} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\alpha + \beta) \quad 3.2(2)$$

よって、 PQ は次式で表される。

$$PQ = OQ - OP = \xi \sin\alpha - \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\alpha + \beta) \quad 3.2(3)$$

点 P のひずみを ε_{si} としたとき、次式成立する。

$$\frac{OQ}{\varepsilon_{cc}} = \frac{PQ}{\varepsilon_{si}} \quad 3.2(4)$$

したがって、式 3.2(2)~(4) より、

$$\frac{\xi \sin\alpha}{\varepsilon_{cc}} = \frac{\xi \sin\alpha - \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\alpha + \beta)}{\varepsilon_{si}} \quad 3.2(5)$$

ε_{si} について解けば、次式を得る。

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_{cc} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(\alpha + \beta)}{\xi \sin\alpha} \right\} \quad 3.2(6)$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha \cos\beta + \cos\alpha \sin\beta = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \sin\alpha + \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \cos\alpha \quad \text{を用いて}$$

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_{cc} \left\{ 1 - \frac{1}{\xi \sin\alpha} (x_i \sin\alpha + y_i \cos\alpha) \right\} = \varepsilon_{cc} \left(1 - \frac{x_i}{\xi} - \frac{y_i}{\eta} \right) \quad 3.2(7)$$

以上より、断面内任意点(x_i,y_i)でのひずみ ε_{si} は、圧縮側最外縁のひずみ ε_{cc} と中立軸の X,Y 切片 ξ, η を用いて、次式で表すことができる。

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_{cc} \left(1 - \frac{x_i}{\xi} - \frac{y_i}{\eta} \right) \quad 3.2(8)$$

ここに、ξ および η は、中立軸位置 x (O 点から中立軸までの最短距離 : OQ の長さ) と中立軸傾斜角 α を用いて、次式の関係がある。

$$\xi = \frac{x}{\sin\alpha} \quad \eta = \frac{x}{\cos\alpha} \quad 3.2(9)$$

3.3 コンクリート圧縮応力の合力 N_c

3.3.1 N_c の値

終局曲げモーメントを算出するためには、圧縮側最外縁においてコンクリート終局ひずみに達する条件と軸方向力の釣合条件により、中立軸位置 x に関する方程式を導入し、さらにモーメントの釣合条件により終局曲げモーメントを算出することになるが、その際にコンクリート圧縮応力の合力値や合力の作用点位置が必要になる。以下では、コンクリート圧縮応力の合力値 N_c を算出する式を誘導する。

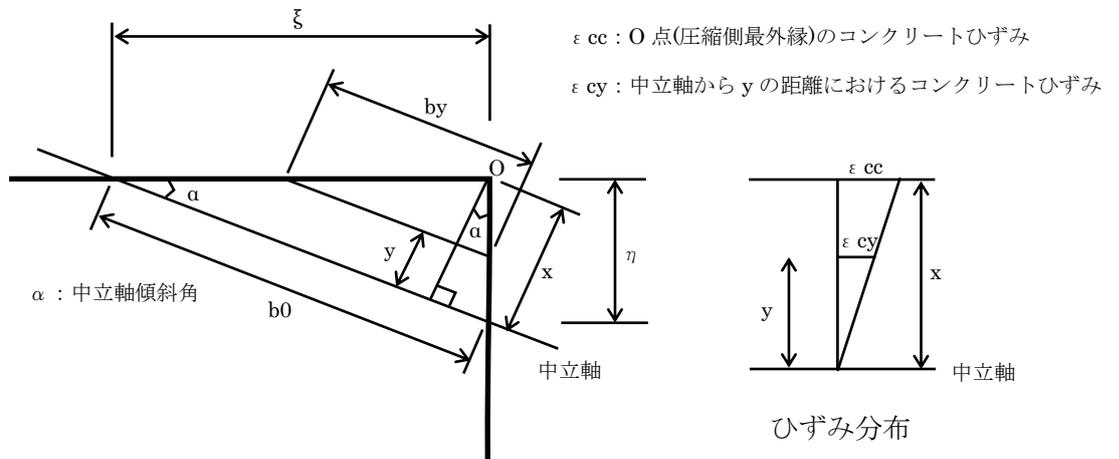


図 3.3.1-1 コンクリート圧縮応力の合力 N_c

図 3.3.1-1 を参照し、b₀ は、中立軸位置 x と中立軸傾斜角 α により、次式で表すことができる。

$$b_0 = \frac{x}{\tan\alpha} + x \tan\alpha = \frac{x}{\sin\alpha \cos\alpha} \quad 3.3.1(1)$$

また、b₀ と b_y および ε_{cc} と ε_{cy} には、以下の幾何学的関係がある。

$$\frac{x}{b_0} = \frac{x-y}{b_y} \quad 3.3.1(2)$$

$$\frac{x}{\varepsilon_{cc}} = \frac{y}{\varepsilon_{cy}} \quad 3.3.1(3)$$

コンクリート圧縮応力 σ_{cy} の合力 N_c は、次式で表すことができる。

$$N_c = \int_0^x \sigma_{cy} b_y dy = \int_0^x f(\varepsilon_{cy}) b_y dy \quad 3.3.1(4)$$

ここに、 σ_{cy} は ε_{cy} の関数として、 $\sigma_{cy}=f(\varepsilon_{cy})$ で表されるとした。

式 3.3.1(3) より、 $y/x = \varepsilon_{cy} / \varepsilon_{cc}$ 、式 3.3.1(2) より $b_y=b_0(1-y/x)$ を考慮すれば、

$$b_y = b_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cc}}\right) \quad 3.3.1(5)$$

また、式 3.3.1(3) より、 $y=(x/\varepsilon_{cc})\varepsilon_{cy}$ を考慮すれば

$$dy = \frac{x}{\varepsilon_{cc}} d\varepsilon_{cy} \quad 3.3.1(6)$$

式 3.3.1(5) と (6) を、式 3.3.1(4) に代入すれば、次式を得る。

$$N_c = \int_0^{\varepsilon_{cc}} f(\varepsilon_{cy}) b_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cc}}\right) \frac{x}{\varepsilon_{cc}} d\varepsilon_{cy} \quad 3.3.1(7)$$

ここに、積分範囲については、 $y : 0 \rightarrow x$ のとき、 $\varepsilon_{cy} : 0 \rightarrow \varepsilon_{cc}$ となることを考慮した。

式 3.3.1(7) に、式 3.3.1(1) を代入すれば、 N_c の算出式として、次式が得られる。

$$N_c = \frac{x^2}{\varepsilon_{cc} \sin \alpha \cos \alpha} \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cc}}\right) f(\varepsilon_{cy}) d\varepsilon_{cy} \quad 3.3.1(8)$$

式 3.3.1(8) は、コンクリートの応力ひずみ関係 $\sigma_{cy}=f(\varepsilon_{cy})$ が既知のとき、台形公式などの数値積分により計算可能である。また、解析的に積分を実行して積分結果を解析式によって計算することもできるが、具体的な式表示については、後述する。

3.3.2 N_c の作用点

モーメントの釣合を考慮するとき、 N_c の作用点の座標が必要になる。以下では、 N_c の作用点に関し、中立軸直交方向に測った圧縮側最外縁 O からの距離 \bar{y} と、座標値 (g_x, g_y) を求める。

中立軸に関するモーメントの釣合により、次式が成立する。

$$N_c(x - \bar{y}) = \int_0^x \sigma_{cy} b_y dy \cdot y \quad 3.3.2(9)$$

ここで、 $\sigma_{cy}=f(\varepsilon_{cy})$ 、式 3.3.1(5)、式 3.3.1(1)、および $y=(x/\varepsilon_{cc})\varepsilon_{cy}$ を考慮すれば、次式を得る。また、積分範囲については、 $y : 0 \rightarrow x$ のとき、 $\varepsilon_{cy} : 0 \rightarrow \varepsilon_{cc}$ となることを考慮する。

$$N_c(x - \bar{y}) = \frac{x^3}{\varepsilon_{cc}^2 \sin \alpha \cos \alpha} \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cc}}\right) f(\varepsilon_{cy}) \varepsilon_{cy} d\varepsilon_{cy} \quad 3.3.2(10)$$

\bar{y} について解けば、

$$\bar{y} = x - \frac{\frac{x^3}{\varepsilon_{cc}^2 \sin \alpha \cos \alpha} \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cc}}\right) f(\varepsilon_{cy}) \varepsilon_{cy} d\varepsilon_{cy}}{N_c} \quad 3.3.2(11)$$

式 3.3.2(11) に、式 3.3.1(8) を代入すれば、 N_c 作用点の圧縮側最外縁からの距離 \bar{y} (中立軸直交方向に測る) が次式で得られる。

$$\bar{y} = x - \frac{\frac{x}{\varepsilon_{cc}} \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cc}}\right) f(\varepsilon_{cy}) \varepsilon_{cy} d\varepsilon_{cy}}{\int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{cy}}{\varepsilon_{cc}}\right) f(\varepsilon_{cy}) d\varepsilon_{cy}} \quad 3.3.2(12)$$

式 3.3.2(12) には、被積分関数が $(1 - \varepsilon / \varepsilon_{cc}) f(\varepsilon)$ と $(1 - \varepsilon / \varepsilon_{cc}) f(\varepsilon) \varepsilon$ の 2 種類の積分計算が現れる。本報告で作成したマクロでは、前者を「積分 1」、後者を「積分 2」と呼んでいる。いずれの積分も、数値積分あるいは解析式による計算が可能である。具体的な式表示については、後述する。

次に、 N_c の作用点の座標値を求める。

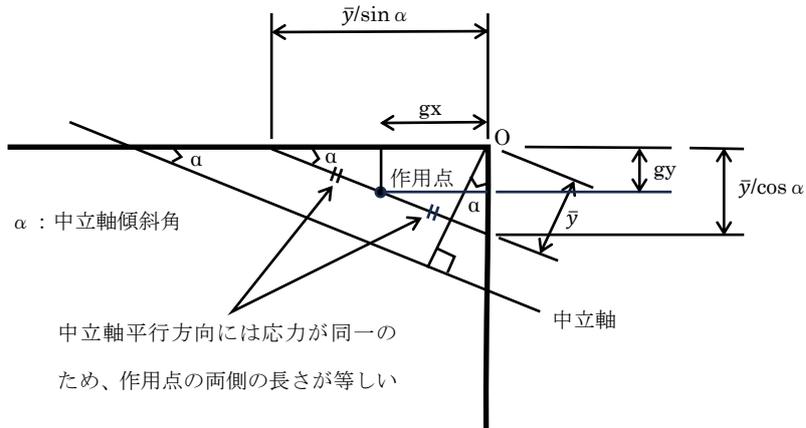


図 3.3.2-1 N_c の作用点の座標

図 3.3.2-1 を参照し、コンクリート圧縮応力の合力の作用点の座標(g_x, g_y)が、次式で表される。

$$g_x = \frac{\bar{y}}{2 \sin \alpha} \quad g_y = \frac{\bar{y}}{2 \cos \alpha} \tag{3.3.2(13)}$$

3.3.3 積分 1 および積分 2

N_c の値および N_c の作用点の算出において、2 種類の積分計算が現れる。以下では、その解析式を誘導する。

(1) 積分 1

コンクリートの応力・ひずみ関係 $\sigma = f(\epsilon)$ として、土木学会・コンクリート標準示方書・設計編 (2017 年制定 p.181) に従い、図 3.3.3-1 に示すように放物線と直線の組み合わせでモデル化する。

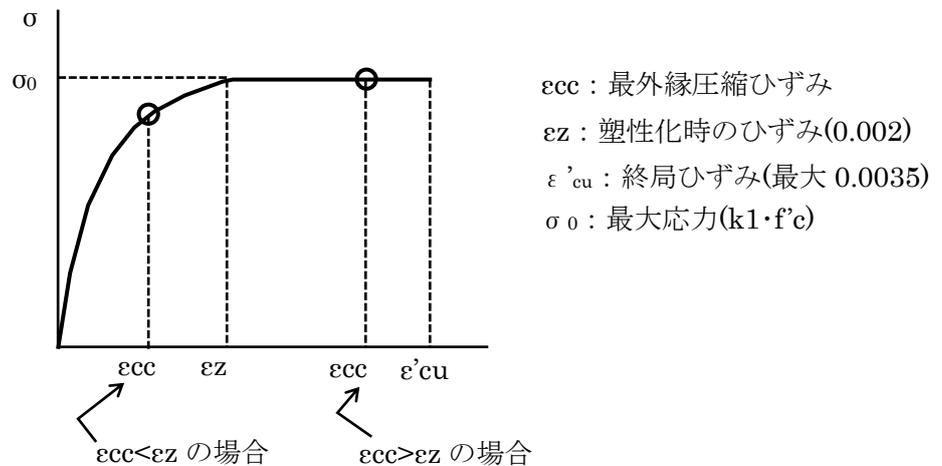


図 3.3.3-1 コンクリートの応力・ひずみ関係

コンクリートの応力ひずみ関係を、式 3.3.3(1)に示す。

$$\sigma_c = \begin{cases} k_1 f'_c \frac{\varepsilon_c}{0.002} \left(2 - \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right) & (\varepsilon_c < 0.002 \text{ のとき}) \\ k_1 f'_c & (0.002 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_{cu} \text{ のとき}) \end{cases} \quad 3.3.3(1)$$

ここに、 σ_c : コンクリート圧縮応力(N/mm²)、

ε_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/mm²)

$k_1 = 1 - 0.003 f'_c$ (≤ 0.85)

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

積分 1 (I_1) は、次式で表される。

$$I_1 = \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad 3.3.3(2)$$

$\varepsilon_{cc} < \varepsilon_z$ の場合と $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_z$ の場合に分けて、 I_1 を計算する。

(a) $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_z$ のとき

$$I_1 = \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right) \sigma_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \right) d\varepsilon \quad 3.3.3(3)$$

ここで、 $x = \varepsilon / \varepsilon_z$ と置き、 $\varepsilon = \varepsilon_z \cdot x$ 、 $d\varepsilon = \varepsilon_z \cdot dx$ を考慮すれば、

$$I_1 = \int_0^{\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_z}} \left(1 - \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{cc}} x \right) \sigma_0 x (2 - x) \varepsilon_z dx \quad 3.3.3(4)$$

ここで、 $r = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_z$ を定義する。

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_0 \varepsilon_z \int_0^r \left(1 - \frac{x}{r} \right) x (2 - x) dx = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{r} \int_0^r \{ 2rx - (r+2)x^2 + x^3 \} dx \\ &= \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{r} \left[rx^2 - \frac{1}{3}(r+2)x^3 + \frac{x^4}{4} \right]_0^r = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{12} r^2 (4 - r) \end{aligned} \quad 3.3.3(5)$$

(b) $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_z$ のとき

(a)と同様に、 $x = \varepsilon / \varepsilon_z$ と置き、また $r = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_z$ を定義する。

$$I_1 = I_{1a} + I_{1b} = \int_0^{\varepsilon_z} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right) \sigma_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \right) d\varepsilon + \int_{\varepsilon_z}^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right) \sigma_0 d\varepsilon \quad 3.3.3(6)$$

$$\begin{aligned} I_{1a} &= \sigma_0 \varepsilon_z \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{r} \right) x (2 - x) dx = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{r} \int_0^1 \{ 2rx - (r+2)x^2 + x^3 \} dx \\ &= \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{r} \left[rx^2 - \frac{1}{3}(r+2)x^3 + \frac{x^4}{4} \right]_0^1 = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{12r} (8r - 5) \end{aligned} \quad 3.3.3(7)$$

$$I_{1b} = \sigma_0 \varepsilon_z \int_1^r \left(1 - \frac{x}{r} \right) dx = \sigma_0 \varepsilon_z \left[x - \frac{x^2}{2r} \right]_1^r = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{2r} (r - 1)^2 \quad 3.3.3(8)$$

$$I_1 = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{12r} (8r - 5) + \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{2r} (r - 1)^2 = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{12r} (6r^2 - 4r + 1) \quad 3.3.3(9)$$

(2) 積分 2

積分 2 (I₂) は、次式で表される。

$$I_2 = \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) f(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon \quad 3.3.3(10)$$

$\varepsilon_{cc} < \varepsilon_z$ の場合と $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_z$ の場合に分けて、I₂ を計算する。

(a) $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_z$ のとき

積分 1 と同様に、 $x = \varepsilon / \varepsilon_z$ と置き、また $r = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_z$ を定義する。

$$I_2 = \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) \sigma_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z}\right) \varepsilon d\varepsilon \quad 3.3.3(11)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \sigma_0 \varepsilon_z^2 \int_0^r \left(1 - \frac{x}{r}\right) x^2 (2 - x) dx = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{r} \int_0^r \{2rx^2 - (r+2)x^3 + x^4\} dx \\ &= \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{r} \left[\frac{2r}{3} x^3 - \frac{1}{4} (r+2)x^4 + \frac{x^5}{5} \right]_0^r = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{60} r^3 (10 - 3r) \end{aligned} \quad 3.3.3(12)$$

(b) $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_z$ のとき

積分 1 と同様に、 $x = \varepsilon / \varepsilon_z$ と置き、また $r = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_z$ を定義する。

$$I_2 = I_{2a} + I_{2b} = \int_0^{\varepsilon_z} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) \sigma_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z}\right) \varepsilon d\varepsilon + \int_{\varepsilon_z}^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) \sigma_0 \varepsilon d\varepsilon \quad 3.3.3(13)$$

$$\begin{aligned} I_{2a} &= \sigma_0 \varepsilon_z^2 \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{r}\right) x^2 (2 - x) dx = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{r} \int_0^1 \{2rx^2 - (r+2)x^3 + x^4\} dx \\ &= \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{r} \left[\frac{2r}{3} x^3 - \frac{1}{4} (r+2)x^4 + \frac{x^5}{5} \right]_0^1 = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{60r} (25r - 18) \end{aligned} \quad 3.3.3(14)$$

$$I_{2b} = \sigma_0 \varepsilon_z^2 \int_1^r \left(1 - \frac{x}{r}\right) x dx = \sigma_0 \varepsilon_z^2 \left[\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3r} \right]_1^r = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{6r} (r^3 - 3r + 2) = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{6r} (r - 1)^2 (r + 2) \quad 3.3.3(15)$$

$$I_2 = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{60r} (25r - 18) + \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{6r} (r^3 - 3r + 2) = \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{60r} (10r^3 - 5r + 2) \quad 3.3.3(16)$$

以上より、積分 1 および積分 2 の結果を、以下の通り整理することができる。

$r = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_z$ 、 $\sigma_0 = k_1 \cdot f_c$ のもとに、

$$\text{積分 1 : } I_1 = \begin{cases} \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{12} r^2 (4 - r) & (r < 1) \\ \frac{\sigma_0 \varepsilon_z}{12r} (6r^2 - 4r + 1) & (r \geq 1) \end{cases} \quad 3.3.3(17)$$

$$\text{積分 2 : } I_2 = \begin{cases} \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{60} r^3 (10 - 3r) & (r < 1) \\ \frac{\sigma_0 \varepsilon_z^2}{60r} (10r^3 - 5r + 2) & (r \geq 1) \end{cases} \quad 3.3.3(18)$$

3.4 鉄筋応力による軸方向力 N_{si}

鉄筋応力および鉄筋応力による軸方向力は、3.2 で求めた断面内任意点のひずみから算出できる。

i 番目の鉄筋の座標位置を (x_{si}, y_{si}) とするとき、 i 番目の鉄筋の軸方向力 N_{si} は、以下の通り表すことができる。

$$N_{si} = E_s \varepsilon_{si} A_{si} \quad 3.4(1)$$

ここに、 ε_{si} : i 番目鉄筋のひずみ(正值および負値)

E_s : 鉄筋のヤング係数

A_{si} : i 番目鉄筋の断面積

ただし、鉄筋応力が降伏強度を超えたとき、降伏強度に一致させる。すなわち、 $\varepsilon_{si} > f_y/E_s$ のとき、 $N_{si} = f_y \cdot A_{si}$ とする。ここに、 f_y : 鉄筋の降伏強度 である。

なお、式 3.4(1)の ε_{si} は、3.2 より、次式で表すことができる。

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_{cc} \left(1 - \frac{x_{si}}{\xi} - \frac{y_{si}}{\eta} \right) \quad 3.4(2)$$

ここに、 ε_{cc} : 圧縮側最外縁のひずみ、 ξ : 中立軸の X 切片、 η : 中立軸の Y 切片

式 3.4(2)の ξ および η は、中立軸傾斜角 α と中立軸位置 x (圧縮側最外縁から中立軸位置までの距離) により、次式で表される。

$$\xi = \frac{x}{\sin \alpha} \quad \eta = \frac{x}{\cos \alpha} \quad 3.4(3)$$

3.5 中立軸位置 x の算出

3.3 および 3.4 で導入したコンクリート圧縮応力合力 N_c と鉄筋軸方向力 N_{si} を用い、断面軸方向の力の釣合を考慮して中立軸位置 x を求める。ここに、中立軸位置 x とは、圧縮側最外縁から中立軸までの最短距離である。

断面軸方向の力の釣合式は、以下で表すことができる。

$$f(x, N, \alpha) = N_c + \sum_i N_{si} - N = 0 \quad 3.5(1)$$

ここに、 N_c : コンクリート圧縮応力の総和

N_{si} : i 番目鉄筋の軸方向力 (圧縮正)

\sum_i : 全ての鉄筋の軸方向力を総和

N : 軸力 (圧縮正)

x : 中立軸位置 (圧縮側最外縁から中立軸までの最短距離)

α : 中立軸傾斜角

式 3.5(1)では、中立軸位置 x の算出式を $f(x, N, \alpha) = 0$ で表しているが、軸力 N と中立軸傾斜角 α が既知のとき、中立軸位置 x を決定できることを示している。ただし、 x に関する 3 次方程式となり陽な形で解を求めるのがやや複雑なので、 $f(x, N, \alpha) = 0$ を満たす x を繰り返し計算によって求めるのがよいと考えられる。

終局時の中立軸位置 x の概略算定手順を、以下に示す。

(1)終局ひずみ ε'_{cu} を設定し、最外縁圧縮ひずみ $\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_{cu}$ とする。

(2)軸力 N を設定する (N は最大軸力と最小軸力の範囲を変化、詳細は後述)。

- (3)中立軸傾斜角 α を設定する (α は $0^\circ \sim 90^\circ$ までの範囲を変化)。
 (4)中立軸位置 x の初期値として、 $x=0$ (実際には小さい値) を仮定する。
 (5)中立軸の X 切片 ξ および Y 切片 η を、 $\xi=x/\sin \alpha$ 、 $\eta=x/\cos \alpha$ で求める。
 (6)中立軸位置により、CASE1~CASE5 のいずれかを判定する (CASE については後述)。
 (7)コンクリート圧縮応力の総和 N_c を求める。
 (8)鉄筋の軸方向力の総和 $\sum N_{si}$ を求める。
 (9)式 3.5(1)の左辺 $f(x, N, \alpha)$ の値を求める。さらに、 x の値を修正して(5)に戻り、 $f(x, N, \alpha)$ の符号が変化する x を求める。
 (10)(3)に戻り、異なる中立軸傾斜角 α に対して同様の計算を行う。
 (11)(2)に戻り、異なる軸力 N に対して同様の計算を行う。
 (12)以上の手順を実行することにより、軸力 N および中立軸傾斜角 α の全ての組み合わせに対して、中立軸位置 x が決定される。

3.6 終局曲げモーメントの算出

モーメントの釣合条件により、断面中心に関する X 軸周りおよび Y 軸周りの終局曲げモーメント M_x および M_y を求める。このとき、軸力 N は断面中心に作用するものとし、終局曲げモーメントへの寄与を考慮しない。

断面中心に関する X 軸周りの曲げモーメントへのコンクリート圧縮応力の寄与 M_{cx} は、次式で表すことができる。

$$M_{cx} = N_c \left(\frac{H}{2} - gy \right) \quad 3.6(1)$$

ここに、 H : 断面高さ

gy : コンクリート圧縮応力の合力作用点の Y 座標 (式 3.3.2(13)による)

N_c : コンクリート圧縮応力の合力値 (式 3.3.1(8)による)

同様に、断面中心に関する Y 軸周りの曲げモーメントへのコンクリート圧縮応力の寄与 M_{cy} は、次式で表すことができる。

$$M_{cy} = N_c \left(\frac{B}{2} - gx \right) \quad 3.6(2)$$

ここに、 B : 断面幅

gx : コンクリート圧縮応力の合力作用点の X 座標 (式 3.3.2(13)による)

N_c : コンクリート圧縮応力の合力値 (式 3.3.1(8)による)

断面中心に関する X 軸周りの曲げモーメントへの鉄筋軸方向力の寄与 M_{sx} は、次式で表すことができる。

$$M_{sx} = \sum_i N_{si} \left(\frac{H}{2} - y_{si} \right) \quad 3.6(3)$$

ここに、 H : 断面高さ

y_{si} : i 番目鉄筋位置の Y 座標

N_{si} : i 番目鉄筋の軸方向力 (式 3.4(1)による)

同様に、断面中心に関する Y 軸周りの曲げモーメントへの鉄筋軸方向力の寄与 M_{sy} は、次式で表す

ことができる。

$$M_{sy} = \sum_i N_{si} \left(\frac{B}{2} - x_{si} \right) \quad 3.6(4)$$

ここに、B：断面幅

x_{si} ：i 番目鉄筋位置の X 座標

N_{si} ：i 番目鉄筋の軸方向力（式 3.4(1)による）

以上より、断面中心に関する X 軸周りおよび Y 軸周りの終局曲げモーメント M_x および M_y は、次式で得られる。

$$M_x = M_{cx} + M_{sx} \quad 3.6(5)$$

$$M_y = M_{cy} + M_{sy} \quad 3.6(6)$$

3.7 中立軸位置による N_c の補正について

中立軸の位置によって、コンクリート圧縮応力の発生範囲の形状が、必ずしも三角形とはならないために、応力総和 N_c を補正する必要が生じる。 N_c の補正方法については、松本(1984)に記載される方法を参照する。中立軸位置のケースに関し、図 3.7-1 に示すように CASE1～5 に場合分けを行う。

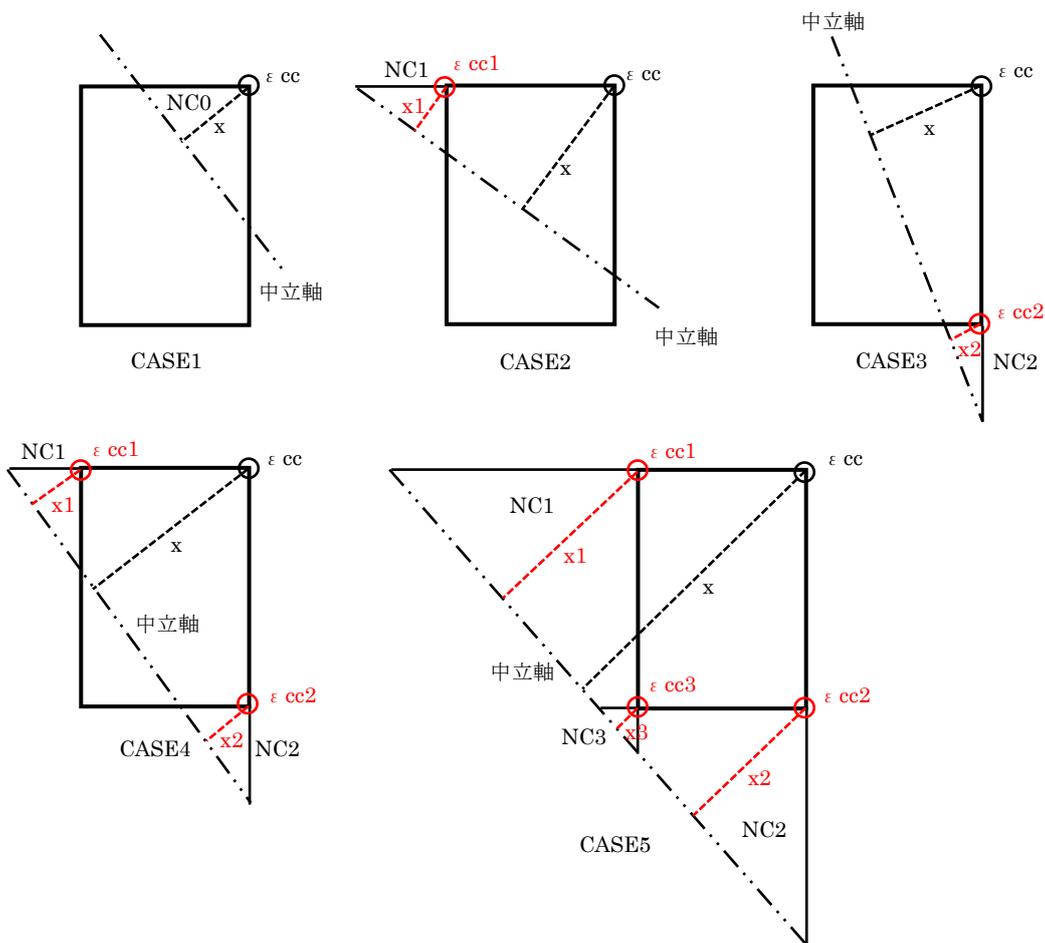


図 3.7-1 中立軸位置による N_c の補正

図 3.7-1 に示すように、CASE1 ではコンクリート圧縮応力範囲 (NC0) が三角形となっており、3.3.1 および 3.3.2 に記載した N_c およびその作用点座標の計算方法が適用できる。しかしながら、他の CASE では台形、五角形および長方形となり、その計算方法がそのまま適用できない。そこで、同図に示した NC1~NC3 が三角形であることから、それらの領域に対応する見かけの応力総和を 3.3.1 と同様の方法で算出し、 N_c の値を補正することとする。

CASE2 を例に補正方法を説明すると、以下の通りである。 ε_{cc} が最外縁圧縮ひずみ、 x が中立軸位置であり、これらの値から領域 NC1 の見かけの最外縁ひずみ ε_{cc1} が式 3.2(8)により求めることができる。さらに、領域 NC1 の見かけの中立軸位置 x_1 と ε_{cc1} を用いて、式 3.3.1(8)により領域 NC1 のコンクリート圧縮応力の総和 N_{c1} を求めることができる。以上より、CASE2 のコンクリート圧縮応力総和は、 ε_{cc} と x から求まる N_c から N_{c1} を差し引くことで算出できる。

上記の ε_{cc1} や x_1 については、以下の式により求めることができる。

・ CASE2,4,5

$$\varepsilon_{cc1} = \varepsilon_{cc} \left(1 - \frac{B}{\xi}\right) \quad \xi = \frac{x}{\sin\alpha} \quad 3.7(1)$$

$$x_1 = x - B \cdot \sin\alpha \quad 3.7(2)$$

・ CASE3,4,5

$$\varepsilon_{cc2} = \varepsilon_{cc} \left(1 - \frac{H}{\eta}\right) \quad \eta = \frac{x}{\cos\alpha} \quad 3.7(3)$$

$$x_2 = x - H \cdot \cos\alpha \quad 3.7(4)$$

・ CASE5

$$\varepsilon_{cc3} = \varepsilon_{cc} \left(1 - \frac{B}{\xi} - \frac{H}{\eta}\right) \quad \xi = \frac{x}{\sin\alpha} \quad \eta = \frac{x}{\cos\alpha} \quad 3.7(5)$$

$$x_3 = x - B \cdot \sin\alpha - H \cdot \cos\alpha \quad 3.7(6)$$

ここに、 B : 断面幅、 H : 断面高さ、 α : 中立軸傾斜角、 x : 中立軸位置

終局曲げモーメントの補正を行うために必要となる、領域 NC1~3 のコンクリート圧縮応力総和の作用位置の座標は、以下の式で求めることができる。

・ CASE2,4,5

$$gx_1 = B + \frac{\bar{y}_1}{2} \frac{1}{\sin\alpha} \quad gy_1 = \frac{\bar{y}_1}{2} \frac{1}{\cos\alpha} \quad 3.7(7)$$

・ CASE3,4,5

$$gx_2 = \frac{\bar{y}_2}{2} \frac{1}{\sin\alpha} \quad gy_2 = H + \frac{\bar{y}_2}{2} \frac{1}{\cos\alpha} \quad 3.7(8)$$

・ CASE5

$$gx_3 = B + \frac{\bar{y}_3}{2} \frac{1}{\sin\alpha} \quad gy_3 = H + \frac{\bar{y}_3}{2} \frac{1}{\cos\alpha} \quad 3.7(9)$$

ここに、 \bar{y}_1 、 \bar{y}_2 および \bar{y}_3 は、それぞれ $\varepsilon_{cc1,x1}$ 、 $\varepsilon_{cc2,x2}$ および $\varepsilon_{cc3,x3}$ に対し、式 3.3.2(12)により計算された値である。

3.8 最大・最小軸力 (N_{max} , N_{min})

軸力の設定は、コンクリート圧壊時の軸力 (式 3.3.3(1)の k_1 を考慮) に鉄筋の降伏軸力を加算した最

大軸力 N_{max} と鉄筋の引張降伏時の最小軸力 N_{min} の範囲とした。最大軸力および最小軸力は、次式で設定した。

$$N_{max} = k_1 f'_c B H + f_y A_{sall} \quad 3.8(1)$$

$$N_{min} = -f_y A_{sall} \quad 3.8(2)$$

ここに、 k_1 ：コンクリート圧縮強度に係る係数で式 3.3.3(1)を参照

f'_c ：コンクリート圧縮強度

B ：断面幅

H ：断面高さ

f_y ：鉄筋降伏強度

A_{sall} ：鉄筋の断面積総和

3.9 釣合軸力および釣合曲げモーメント (N_b, M_{xb}, M_{yb})

圧縮側最外縁において終局ひずみに達したとき、同時に最外縁引張鉄筋が降伏した場合、この破壊モードを釣合破壊と呼び、このときの軸力および曲げモーメントを釣合軸力および釣合曲げモーメントと呼ぶ。釣合軸力と釣合曲げモーメントは、作用軸力には関係しないが、中立軸傾斜角に依存する。

圧縮側最外縁で終局ひずみとなり、最外縁引張鉄筋位置で降伏ひずみとなる条件から、釣合破壊時の中立軸位置 x_b が次式で得られる。

$$x_b = \frac{\varepsilon'_{cu} d_s}{\varepsilon'_{cu} + \frac{f_y}{E_s}} \quad 3.9(1)$$

$$d_s = x_{st} \sin \alpha + y_{st} \cos \alpha \quad 3.9(2)$$

ここに、 ε'_{cu} ：コンクリートの終局ひずみ

f_y ：鉄筋降伏強度

E_s ：鉄筋ヤング係数

d_s ：中立軸直交方向に測った圧縮側最外縁から最外縁引張鉄筋までの距離

x_{st}, y_{st} ：最外縁引張鉄筋位置の X および Y 座標

α ：中立軸傾斜角

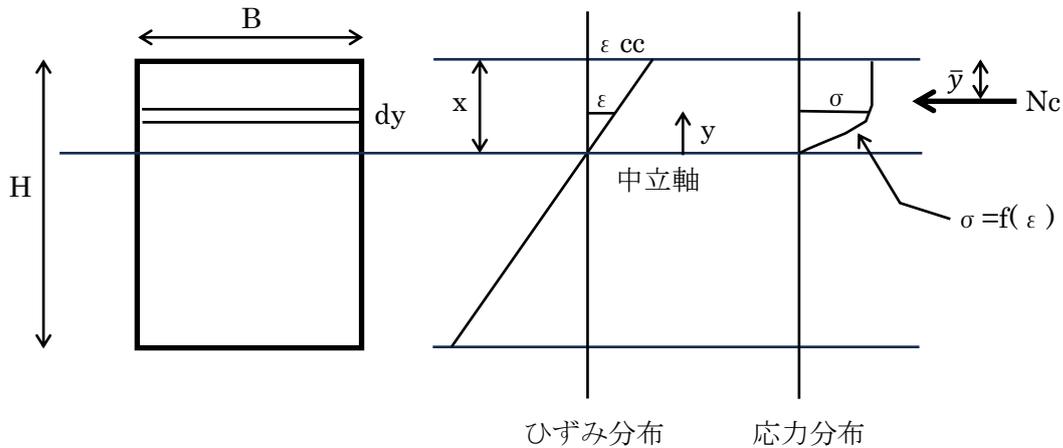
釣合軸力および釣合曲げモーメントは、中立軸位置を上記の x_b としたとき、断面内軸応力の総和および曲げモーメントを算出した。

3.10 中立軸傾斜角 0° あるいは 90° の場合の N_c に関して

3.10.1 N_c の値

中立軸傾斜角 $\alpha=0^\circ$ あるいは $\alpha=90^\circ$ の場合（一軸曲げ）には、3.3 で求めたコンクリート圧縮応力総和 N_c の算出式がそのままの形では適用できなくなる。そこで以下では、この条件下の N_c を別途計算する。なお、道示・耐震編等に提示される分割法によっても算出可能であるが、ここでは二軸曲げの場合と同様に、 N_c の積分式を解析的に求めることとする。

図 3.10.1-1 に、中立軸傾斜角 $\alpha=0^\circ$ における断面仮定を示す。



[記号]

B : 断面幅、 H : 断面高さ、 x : 中立軸位置（圧縮縁からの長さ）、 ϵ_{cc} : 圧縮縁ひずみ
 N_c : コンクリート圧縮応力総和、 \bar{y} : コンクリート圧縮応力総和の作用位置（圧縮縁からの距離）
 $\sigma = f(\epsilon)$: コンクリートの応力ひずみ関係、 y : 中立軸から上方にとった座標値、 ϵ : y におけるひずみ、 σ : y におけるコンクリート応力

図 3.10.1-1 $\alpha=0^\circ$ の場合の断面仮定

コンクリート圧縮応力総和 N_c は、次式で表すことができる。

$$N_c = \int_0^x B \cdot dy \cdot \sigma = \int_0^x B f(\epsilon) dy \quad 3.10.1(1)$$

$y = (x / \epsilon_{cc}) \cdot \epsilon$ を考慮し、変数 y を ϵ に置換すれば、 $dy = (x / \epsilon_{cc}) d\epsilon$ 、積分範囲が 0 から ϵ_{cc} になるから、式 3.10.1(1) は次式となる。

$$N_c = \frac{Bx}{\epsilon_{cc}} \int_0^{\epsilon_{cc}} f(\epsilon) d\epsilon \quad 3.10.1(2)$$

$$\text{ここに、} f(\epsilon) = \begin{cases} \sigma_0 \frac{\epsilon}{\epsilon_z} \left(2 - \frac{\epsilon}{\epsilon_z} \right) & (\epsilon < \epsilon_z) \\ \sigma_0 & (\epsilon \geq \epsilon_z) \end{cases}$$

$$\sigma_0 = k_1 f'_c$$

(a) $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_z$ のとき

$\varepsilon = \varepsilon_z \cdot t$ と置けば、 $d\varepsilon = \varepsilon_z dt$ であり、 $r = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_z$ を定義すれば、変数 t に関する積分範囲は 0 から r となるから、式 3.10.1(2)は、次式となる。

$$N_c = \frac{Bx}{\varepsilon_{cc}} \int_0^r \sigma_0 t (2-t) \varepsilon_z dt = Bx \sigma_0 \frac{1}{r} \int_0^r t(2-t) dt = Bx \sigma_0 \frac{1}{r} \left[t^2 - \frac{t^3}{3} \right]_0^r = \frac{Bx \sigma_0}{3} r(3-r) \quad 3.10.1(3)$$

(b) $\varepsilon_{cc} \geq \varepsilon_z$ のとき

$$N_c = \frac{Bx}{\varepsilon_{cc}} \int_0^{\varepsilon_z} \sigma_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \right) d\varepsilon + \frac{Bx}{\varepsilon_{cc}} \int_{\varepsilon_z}^{\varepsilon_{cc}} \sigma_0 d\varepsilon = I_1 + I_2 \quad 3.10.1(4)$$

(a)と同様に、変数 t と r を定義すれば、 I_1 の t に関する積分範囲は、0 から 1 となり、以下のように書ける。

$$I_1 = \frac{Bx}{\varepsilon_{cc}} \int_0^1 \sigma_0 t (2-t) \varepsilon_z dt = Bx \sigma_0 \frac{1}{r} \int_0^1 t(2-t) dt = Bx \sigma_0 \frac{1}{r} \left[t^2 - \frac{t^3}{3} \right]_0^1 = \frac{2Bx \sigma_0}{3r} \quad 3.10.1(5)$$

I_2 についても、同様に変数 t と r を定義すれば、 I_2 の t に関する積分範囲は、1 から r となり、以下のように書ける。

$$I_2 = Bx \sigma_0 \frac{1}{r} \int_1^r dt = Bx \sigma_0 \frac{1}{r} [t]_1^r = \frac{Bx \sigma_0}{r} (r-1) \quad 3.10.1(6)$$

したがって、式 3.10.1(4)~3.10.1(6)より、

$$N_c = \frac{2Bx \sigma_0}{3r} + \frac{Bx \sigma_0}{r} (r-1) = \frac{Bx \sigma_0}{3r} (3r-1) \quad 3.10.1(7)$$

以上より、 N_c の値は、 $r < 1$ あるいは $r \geq 1$ により、以下の通り表される。

$$N_c = \begin{cases} \frac{Bx \sigma_0}{3} r(3-r) & (r < 1) \\ \frac{Bx \sigma_0}{3r} (3r-1) & (r \geq 1) \end{cases} \quad 3.10.1(8)$$

ここに、 $r = \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_z}$

B : 断面幅、 x : 中立軸位置 (圧縮縁から中立軸までの距離)、 σ_0 : 最大応力 (= $k_1 f'c$)、 ε_{cc} : 圧縮縁におけるひずみ、 ε_z : 塑性化し始めるひずみ (=0.002)

式 3.10.1(8)により、コンクリート応力総和 N_c を求めることができる。なお、終局時を想定し圧縮縁ひずみ $\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_{cu} = 0.0035$ とした場合、 $r = 1.75$ となり、 $N_c = 0.8095 B \cdot k_1 \cdot f'c \cdot x$ が得られるが、この係数値は、等価応力ブロック法における $\beta_1 = 0.8$ とほぼ等しいことがわかる。

3.10.2 N_c の作用点

コンクリート圧縮応力総和 N_c の作用点の圧縮縁からの距離 \bar{y} を求める。

中立軸周りのコンクリート応力総和のモーメントの釣合により、次式が成立する。

$$N_c(x - \bar{y}) = \int_0^x B \cdot dy \cdot \sigma \cdot y \quad 3.10.2(9)$$

\bar{y} について解けば、次式が得られる。

$$\bar{y} = x - \frac{\int_0^x B \sigma y dy}{N_c} \quad 3.10.2(10)$$

ここで、式 3.10.2(10)の右辺の積分値を I とし、 $y = (x / \varepsilon_{cc}) \cdot \varepsilon$ 、 $dy = (x / \varepsilon_{cc}) d\varepsilon$ の変数変換を行えば、

次式を得る。

$$I = \frac{Bx^2}{\varepsilon_{cc}^2} \int_0^{\varepsilon_{cc}} f(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon \quad 3.10.2(11)$$

$$\text{ここに、} f(\varepsilon) = \begin{cases} \sigma_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z}\right) & (\varepsilon < \varepsilon_z) \\ \sigma_0 & (\varepsilon \geq \varepsilon_z) \end{cases}$$

$$\sigma_0 = k_1 f'_c$$

(a) $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_z$ のとき

$\varepsilon = \varepsilon_z t$ と置けば、 $d\varepsilon = \varepsilon_z dt$ であり、 $r = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_z$ を定義すれば、変数 t に関する積分範囲は 0 から r となるから、式 3.10.2(11)は、次式となる。

$$I = \frac{Bx^2}{\varepsilon_{cc}^2} \sigma_0 \int_0^r t^2 (2-t) \varepsilon_z^2 dt = Bx^2 \sigma_0 \frac{1}{r^2} \left[\frac{2}{3} t^3 - \frac{t^4}{4} \right]_0^r = \frac{Bx^2 \sigma_0 r}{12} (8 - 3r) \quad 3.10.2(12)$$

(b) $\varepsilon_{cc} \geq \varepsilon_z$ のとき

$$I = \frac{Bx^2}{\varepsilon_{cc}^2} \int_0^{\varepsilon_z} \sigma_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_z}\right) \varepsilon d\varepsilon + \frac{Bx^2}{\varepsilon_{cc}^2} \int_{\varepsilon_z}^{\varepsilon_{cc}} \sigma_0 \varepsilon d\varepsilon = I_1 + I_2$$

(a)と同様に、変数 t と r を定義すれば、 I_1 の t に関する積分範囲は、0 から 1 となり、以下のように書ける。

$$I_1 = \frac{Bx^2}{\varepsilon_{cc}^2} \int_0^1 \sigma_0 t^2 (2-t) \varepsilon_z^2 dt = \frac{Bx^2 \sigma_0}{r^2} \left[\frac{2}{3} t^3 - \frac{t^4}{4} \right]_0^1 = \frac{5Bx^2 \sigma_0}{12r^2} \quad 3.10.2(13)$$

I_2 についても、同様に変数 t と r を定義すれば、 I_2 の t に関する積分範囲は、1 から r となり、以下のように書ける。

$$I_2 = Bx^2 \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \int_1^r t dt = Bx^2 \sigma_0 \frac{1}{r^2} \left[\frac{t^2}{2} \right]_1^r = \frac{Bx^2 \sigma_0}{2r^2} (r^2 - 1) \quad 3.10.2(14)$$

したがって、式 3.10.2(12)~3.10.2(14)より、

$$I = \frac{5Bx^2 \sigma_0}{12r^2} + \frac{Bx^2 \sigma_0}{2r^2} (r^2 - 1) = \frac{Bx^2 \sigma_0}{12r^2} (6r^2 - 1) \quad 3.10.2(15)$$

式 3.10.2(12)と 3.10.2(15)を、式 3.10.2(10)に代入し、かつ N_c に式 3.10.1(8)を用いることにより、 \bar{y} が以下のように表すことができる。

$$\bar{y} = x - \frac{I}{N_c} = \begin{cases} \frac{4-r}{4(3-r)} x & (r < 1) \\ \frac{6r^2-4r+1}{4r(3r-1)} x & (r \geq 1) \end{cases} \quad 3.10.2(16)$$

ここに、 $r = \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_z}$

x : 中立軸位置 (圧縮縁から中立軸までの距離)、 ε_{cc} : 圧縮縁におけるひずみ、 ε_z : 塑性化し始めるひずみ (=0.002)

式 3.10.2(16)により、コンクリート応力総和の作用点位置 \bar{y} を求めることができる。なお、終局時を想定し圧縮縁ひずみ $\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_{cu} = 0.0035$ とした場合、 $r = 1.75$ となり、 $\bar{y} = 0.4160x$ が得られるが、この値は等価応力ブロック法における $a/2 = \beta_1 \cdot x/2 = 0.4x$ とほぼ等しいことがわかる。

3.10.3 中立軸が引張縁より下がった場合の補正に関して

圧縮軸力が大きくコンクリート圧壊に近いようなケースでは、中立軸が引張縁よりも下に位置する場合があります。このようなケースでは、コンクリート圧縮応力総和の計算において、無意味な断面外のコンクリート応力が加算されてしまうために、断面外のコンクリート応力分を差し引いて N_c や \bar{y} を補正する必要が生じる。

補正方法は、二軸曲げの場合と同様の考え方を用い、引張縁でのひずみを見かけの ϵ_{cc} とし、引張縁から中立軸までの距離を見かけの x として断面外の N_c や \bar{y} を計算し、断面外の応力分を差し引いて算出することとする。

断面外のコンクリート応力を求めるための引張縁位置でのひずみ $\epsilon_{c bt}$ や見かけの中立軸位置 x_{bt} は、以下の式で求めることができる。

$$\epsilon_{c bt} = \frac{x-H}{x} \epsilon_{cc} \quad 3.10.3(1)$$

$$x_{bt} = x - H \quad 3.10.3(2)$$

ここに、 x ：中立軸位置（圧縮縁から中立軸位置までの距離）

H ：断面高さ（ただし、 $\alpha=90^\circ$ のときは断面幅 B を用いる）

ϵ_{cc} ：圧縮縁におけるひずみ

3.11 降伏耐力に関して

本マクロでは、二軸曲げに対する降伏耐力も算出可能である。終局耐力の算出においては、最外縁圧縮ひずみ ϵ_{cc} に終局ひずみ ϵ'_{cu} を設定しているが、降伏耐力の算出では引張鉄筋が降伏するときのひずみ分布に対応する最外縁圧縮ひずみを ϵ_{cc} に設定すればよい。

最外縁引張鉄筋が降伏するときのひずみ分布に対応する最外縁圧縮ひずみ ϵ_{ccy} は、以下の通り算出することができる。

$$\epsilon_{ccy} = \frac{f_y}{E_s} \frac{x}{d_s - x} \quad 3.11(1)$$

ここに、 $d_s = x_{st} \sin \alpha + y_{st} \cos \alpha$

f_y ：鉄筋降伏強度、 E_s ：鉄筋ヤング係数、 x ：中立軸位置、 d_s ：中立軸直交方向に測った圧縮側最外縁から最外縁引張鉄筋までの距離、 x_{st}, y_{st} ：最外縁引張鉄筋の X および Y 座標、 α ：中立軸傾斜角

3.12 許容曲げモーメントに関して

本マクロでは、二軸曲げに対する許容曲げモーメントも算出可能である。ここに、許容曲げモーメントとは、コンクリート圧縮縁がコンクリート圧縮許容応力度に達するときの曲げモーメント、および最外縁引張鉄筋が鉄筋引張許容応力度に達するときの曲げモーメントであり、これらの曲げモーメントをそれぞれ別に算出している。したがって、2 個の許容曲げモーメントが算出され、実際にはそれらの小さい方の曲げモーメントが許容曲げモーメントとなる。また、両者のどちらが小さい値となるかどうかは、断面諸元や軸力値により異なる。

終局耐力の算出においては、最外縁圧縮ひずみ ϵ_{cc} に終局ひずみ ϵ'_{cu} を設定しているが、コンクリ

ートが許容応力に達する曲げモーメントの算出では、コンクリート圧縮縁が許容応力に達するときのひずみ $\varepsilon_{ca} = \sigma_{ca} / E_c$ (σ_{ca} : コンクリート圧縮許容応力、 E_c : コンクリートヤング係数) を ε_{cc} に設定すればよい。また、鉄筋が許容応力に達する曲げモーメントの算出では、最外縁引張鉄筋が許容応力に達するときのひずみ分布に対応する最外縁圧縮ひずみを ε_{cc} に設定すればよい。

最外縁引張鉄筋が許容応力に達するときのひずみ分布に対応する最外縁圧縮ひずみ ε_{sa} は、以下の通り算出することができる。

$$\varepsilon_{sa} = \frac{\sigma_{sa} \cdot x}{E_s \cdot d_s - x} \quad 3.12(1)$$

ここに、 $d_s = x_{st} \sin \alpha + y_{st} \cos \alpha$

σ_{sa} : 鉄筋引張許容応力、 E_s : 鉄筋ヤング係数、 x : 中立軸位置、 d_s : 中立軸直交方向に測った圧縮側最外縁から最外縁引張鉄筋までの距離、 x_{st}, y_{st} : 最外縁引張鉄筋の X および Y 座標、 α : 中立軸傾斜角

3.12.1 コンクリート圧縮応力の総和 N_c および重心位置 \bar{y}

許容曲げモーメント時におけるコンクリート圧縮応力総和 N_c は、コンクリート応力とひずみに線形関係を仮定し、式 3.3.1(8)を用いることにより終局耐力時と同様に求めることができる。ただし、コンクリート応力 $f(\varepsilon_{cy})$ に次式を使用する。

$$f(\varepsilon_{cy}) = E_c \varepsilon_{cy} \quad 3.12.1(1)$$

N_c の算出式 3.3.1(8)に現れる積分 1 (I_1) は、次式により算出できる。

$$I_1 = \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) E_c \varepsilon d\varepsilon = \frac{E_c}{6} \varepsilon_{cc}^2 \quad 3.12.1(2)$$

ここに、 E_c : コンクリートヤング係数 (= E_s/n 、 E_s : 鉄筋ヤング係数、 n : ヤング係数比 (=15))

ε_{cc} : 圧縮側最外縁ひずみ

許容曲げモーメント時におけるコンクリート圧縮応力総和 N_c の重心位置 \bar{y} は、コンクリート応力とひずみに線形関係を仮定し、式 3.3.2(12)を用いることにより終局耐力時と同様に求めることができる。

\bar{y} の算出式 3.3.2(12)に現れる積分 2 (I_2) は、次式により算出できる。

$$I_2 = \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) E_c \varepsilon^2 d\varepsilon = \frac{E_c}{12} \varepsilon_{cc}^3 \quad 3.12.1(13)$$

3.12.2 許容曲げモーメント時の釣合軸力

許容曲げモーメント発生時においても、釣合軸力や釣合曲げモーメントを定義できる。許容曲げモーメント時の釣合軸力は、圧縮側最外縁においてコンクリート許容圧縮応力 σ_{ca} に達すると同時に、最外縁引張鉄筋が許容引張応力 σ_{sa} に達するときの軸力と考えられる。

圧縮側最外縁でコンクリート圧縮許容ひずみ ε_{ca} となり、最外縁引張鉄筋位置で鉄筋許容引張ひずみ σ_{sa}/E_s となる条件から、釣合軸力時の中立軸位置 x_b が次式で得られる。

$$x_b = \frac{\varepsilon_{ca} d_s}{\varepsilon_{ca} + \frac{\sigma_{sa}}{E_s}} \quad 3.12.2(1)$$

$$d_s = x_{st} \sin \alpha + y_{st} \cos \alpha$$

3.12.2(2)

ここに、 ε_{ca} : コンクリートの許容圧縮ひずみ ($=\sigma_{ca}/E_c$)

σ_{sa} : 鉄筋引張許容応力度 σ_{ca} : コンクリート許容圧縮応力度

E_c : コンクリートヤング係数 ($=E_s/n$) E_s : 鉄筋ヤング係数

n : ヤング係数比 (=15)

d_s : 中立軸直交方向に測った圧縮側最外縁から最外縁引張鉄筋までの距離

x_{st}, y_{st} : 最外縁引張鉄筋位置の X および Y 座標

α : 中立軸傾斜角

釣合軸力および釣合曲げモーメントは、中立軸位置を上記の x_b としたとき、断面内軸応力の総和および曲げモーメントを算出した。

4. マクロでの計算手順

本マクロにおける終局曲げモーメントの計算手順を示す。

(1)終局と降伏に対するループの開始 (imod のループ)

imod=1 および imod=2 に対するループを開始する。imod=1 は終局時、imod=2 は降伏時となる。

iflag4=1 のとき、降伏時の計算も実施し、iflag4≠1 のとき終局時のみの計算を実施する。

許容曲げモーメント算出時 (iflag5=1) には、imod=1 はコンクリート許容時、imod=2 は鉄筋許容時となる。

(2)断面諸元の入力

シート「断面諸元データ」に入力されたデータを取り込む。入力するデータは、以下となる。

- ・ ケース説明 id_case(i) [諸元ケース i に対し]
- ・ 断面の全高 h (単位 : m)
- ・ 断面の幅 b (単位 : m)
- ・ 鉄筋ヤング係数 es (単位 : kN/mm²→kN/m²)
- ・ 鉄筋降伏強度 fy (単位 : N/mm²→kN/m²)
- ・ コンクリートヤング係数 es (マクロ内にて使用しない) (単位 : kN/mm²→kN/m²)
- ・ コンクリート強度 fc (単位 : N/mm²→kN/m²) [fc2 (単位 : N/mm²)]
- ・ 第 1 段 X 方向鉄筋の鉄筋径あるいは断面積 d1x (断面積の場合、単位 : cm²)
- ・ 第 1 段 X 方向鉄筋の鉄筋本数 n1x
- ・ 第 1 段 X 方向手鉄筋のはなれ s1x (単位 : cm→m)
- ・ 第 1 段 X 方向手鉄筋のかぶり c1x (単位 : cm→m)
- ・ 第 1 段 Y 方向鉄筋の鉄筋径あるいは断面積 d1y (断面積の場合、単位 : cm²)
- ・ 第 1 段 Y 方向鉄筋の鉄筋本数 n1y
- ・ 第 1 段 Y 方向手鉄筋のはなれ s1y (単位 : cm→m)
- ・ 第 1 段 Y 方向手鉄筋のかぶり c1y (単位 : cm→m)
- ・ 第 2 段 X 方向鉄筋の鉄筋径あるいは断面積 d2x (断面積の場合、単位 : cm²)
- ・ 第 2 段 X 方向鉄筋の鉄筋本数 n2x
- ・ 第 2 段 X 方向手鉄筋のはなれ s2x (単位 : cm→m)
- ・ 第 2 段 X 方向手鉄筋のかぶり c2x (単位 : cm→m)
- ・ 第 2 段 Y 方向鉄筋の鉄筋径あるいは断面積 d2y (断面積の場合、単位 : cm²)
- ・ 第 2 段 Y 方向鉄筋の鉄筋本数 n2y
- ・ 第 2 段 Y 方向手鉄筋のはなれ s2y (単位 : cm→m)
- ・ 第 2 段 Y 方向手鉄筋のかぶり c2y (単位 : cm→m)
- ・ 軸力の分割数 nnd1
- ・ 中立軸傾斜角度の分割数 nal1
- ・ 指定軸力 (軸力の分割数を 0 としたとき) nd_dsg(i)

(3)追加配筋データの入力

シート「追加配筋データ」に入力されたデータを取り込む。入力するデータは、以下となる。

- ・ 番号
- ・ 鉄筋径あるいは断面積（断面積の場合、単位：cm²）
- ・ 本数
- ・ はなれ（単位：cm→m）
- ・ かぶり（単位：cm→m）
- ・ 配筋方向（「X」あるいは「Y」で指定）

(4)鉄筋位置の座標および鉄筋断面積の設定

xs(i) : i 番目鉄筋位置の X 座標 (m)

ys(i) : i 番目鉄筋位置の Y 座標 (m)

ars(i) : i 番目鉄筋の断面積 (m²)

(5)鉄筋位置の座標および断面積の書き出し

シート「鉄筋位置座標」に鉄筋位置の座標値と断面積を書き出す。また、矩形断面形状の4点の頂点の座標を書き出す。

本シートは、鉄筋データ入力のチェック用として用いる。

(6)最外縁引張鉄筋の番号の取得

最外縁引張鉄筋の鉄筋番号 (ntns) を取得する。断面の右上端点 (原点) からの距離が最も大きい鉄筋の位置を探し、その鉄筋の番目を ntns に保存する。

本データは、鉄筋の降伏判定や釣合軸力の計算に使用する。

(7)コンクリートの塑性化時ひずみ ϵ_0 、コンクリート終局ひずみ ϵ'_{cu} およびコンクリート強度に係る係数 k_1 の設定、許容圧縮ひずみ ϵ_{ca} の設定

マクロ内変数名 : $\epsilon_0 \rightarrow epz$ 、 $\epsilon'_{cu} \rightarrow epu$ 、 $k_1 \rightarrow ck1$

コンクリート標準示方書に従い、epz、epu および ck1 を以下の式で求めた。

$$epz=0.002$$

$$epu=(155-fc2)/30000 \quad (0.0025 \leq epu \leq 0.0035) \quad [fc2 : N/mm^2 \text{ 単位のコンクリート強度}]$$

$$ck1=1-0.003*fc2 \quad (ck1 \leq 0.85)$$

また、許容曲げモーメントを算出時には、許容圧縮ひずみ ϵ_{ca} を次式により求めた。

マクロ変数名 : $\epsilon_{ca} \rightarrow ep_ca$ 、 $E_s \rightarrow ec_許容$

$$ep_ca=sca/ec_許容 \quad (sca : \text{コンクリート許容圧縮応力度})$$

$$es_許容=es/nrt \quad (nrt=15 : \text{ヤング係数比})$$

(8)最大軸力 (ndmax) と最小軸力 (ndmin) の設定

ndmax と ndmin を、以下の式で算出した。

$$ndmax=ck1*fc*b*h+fy*arsall$$

$$ndmin=-fy*arsall$$

ここに、arsall : 全ての鉄筋の断面積総和

本データは、軸力設定時における設定範囲を定めるために使用する。

許容曲げモーメント算出時には、 $ck1*fc$ の代わりに sca (コンクリート許容圧縮応力度) を、 fy の代わりに ssa (鉄筋許容引張応力度) を用いる。

(9)軸力 (nd) に関する繰り返し計算を開始 (j ループ)

変数 j の for ループで、軸力の数 nnd 回の繰り返し計算を開始する。

(10)軸力 (nd) の設定

・ $nnd1 \neq 0$ のとき

0.999* $ndmax$ から 0.999* $ndmin$ までを $nnd1$ 個で等分して設定

・ $nnd1=0$ のとき

入力データで指定した $nd_dsg(i)$ を使用する

(11)中立軸傾斜角度 (al_rad) に関する繰り返し計算を開始 (i ループ)

変数 i の for ループで、中立軸傾斜角の数 nal 回の繰り返し計算を開始する。

(12)中立軸傾斜角 (al_rad) の設定

0° から 90° までを $nal1$ 等分して設定

al_deg : 度単位の中立軸傾斜角

al_rad : rad 単位の中立軸傾斜角

(13)釣合軸力および釣合曲げモーメントの算出

釣合破壊時の中立軸位置 (xb) を次式で求める。

$$xb = epu * ds / (epu + fy / es)$$

ここに、 epu : 終局ひずみ

ds : 圧縮側最外縁から最外縁引張鉄筋位置までの中立軸直交方向に測った距離

fy : 鉄筋降伏強度

es : 鉄筋ヤング係数

許容曲げモーメント算出時には、 epu の代わりに ep_ca (許容圧縮ひずみ) を、 fy の代わりに ssa (鉄筋引張許容応力度) を用いる。

釣合軸力は、断面内軸方向の内力の算出することで得られる。具体的には、式 3.5(1)の左辺において $x=xb$ および $N=0$ とした値 $f(xb, 0, \alpha)$ を計算することにより求めることができる。

$nd_b(icase, i)$: 諸元ケース $icase$ 、中立軸傾斜角 i 番目の釣合軸力

$momx_b(icase, i)$: 諸元ケース $icase$ 、中立軸傾斜角 i 番目の X 方向釣合曲げモーメント

$momy_b(icase, i)$: 諸元ケース $icase$ 、中立軸傾斜角 i 番目の Y 方向釣合曲げモーメント

$iflag1=1$ のとき、無次元化表示とし、軸力を $b*h*fc$ で、X 方向曲げモーメントを $b*h^2*fc$ で、Y 方向曲げモーメントを b^2*h*fc でそれぞれ除する。ここに、 b : 断面幅、 h : 断面高さ、 fc : コンクリート強度 である。

(14)降伏時の軸力範囲の制限

降伏時は、軸力が釣合軸力よりも大きいとき、降伏曲げモーメントを 0 として次のステップに移行する。なお、釣合軸力は終局時 (imod=1) に計算される。

nd_b2(icase,i) : 諸元ケース icase、中立軸傾斜角 i 番目の釣合軸力

(15)中立軸位置 (x) を求めるための繰り返し計算の開始

中立軸位置が、 $x1 < x < x2$ の範囲内にあると仮定し、x を繰り返し計算により算出する。

ここに、x1 および x2 の設定は、終局と降伏で異なり、項目(16)で説明する。

(16)解の存在判定

まず、 $x=x1$ と $x=x2$ における断面軸方向の力の総和 (式 3.5(1)の左辺の値) を計算し、両者の符号が異なることを確認する。ここで、x1 および x2 の値は、終局と降伏で異なり、以下の通り設定する。

終局時およびコンクリート許容時 : $x1=0.00001$ 、 $x2=kxh$

($0.00001 < x < kxh$ に解があると仮定、デフォルト値 $kx=10$)

降伏時および鉄筋許容時 : $x1=-kx2h$ 、 $x2=ds*0.9999$

($-kx2h < x < ds*0.9999$ に解があると仮定、デフォルト値 $kx2=20$)

上記において、降伏時の x2 に使用する ds は、中立軸直交方向に測った原点 (右上隅) から最外縁引張鉄筋までの距離である。

x1 と x2 に対する軸方向応力総和の符号が異なる場合、解 x が存在すると判断する。断面軸方向の力の総和は、「sub cal_sx」で計算され、 $x=x1$ での値は sx1 に、 $x=x2$ での値は sx2 に保存される。これら sx1 および sx2 の値は、先に提示した式 3.5(1)において、 $x=x1, x=x2$ としたときの値 $f(x1, N, \alpha)$ および $f(x2, N, \alpha)$ により求めることが可能である。

・ $sx1*sx2 < 0$ のとき (解が存在する)

$xn=x2$ (現在の x)、 $xn1=x1$ (一つ前の x) および $sxn1=sx1$ (一つ前の sx) として、2 分法による求解に移行する。ここに、2 分法は陽に解けない方程式の解の精度を上げるための繰り返し計算の一方法である。

・ $sx1*sx2 > 0$ のとき (解が存在しない)

中立軸位置 x を 999.0 とし、終局あるいは降伏曲げモーメントを 0 として、次の中立軸傾斜角のケースにスキップする (項目(11)に戻る)。

(17)2 分法による中立軸位置 x の求解

(16)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 分法については、以下に説明を加える。

【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 3.5(1)の左辺に対応している。

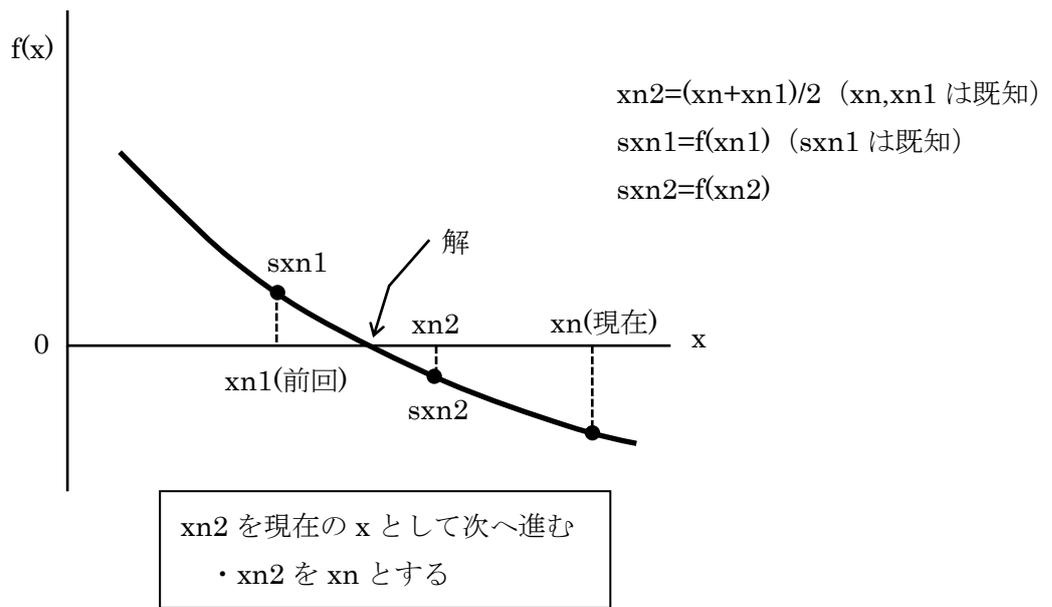
本マクロで中立軸を求める際、中立軸直交方向の 2 点 ($x=x_1, x_2$) における $f(x)$ の値を求め、 $f(x_1)$ と $f(x_2)$ の符号が異なる場合に、 $x_1 < x < x_2$ に中立軸があると判断する ($f(x)$ の単調変化を仮定)。すなわち、現在の $x (=x_n)$ を x_2 、一つ前の $x (=x_{n-1})$ を x_1 として、その間に解が存在するものとしている。なお、 x_1 および x_2 の初期設定値は、手順(16)に記載した通り、終局時は $x_1=0.00001$ および $x_2=k_{kx} \cdot h$ (k_{kx} のデフォルト値は 10)、また降伏時は $x_1=-k_{kx2} \cdot h$ (k_{kx2} のデフォルト値は 20) および $x_2=ds \cdot 0.9999$ (ds : 中立軸直交方向に測った原点 (右上隅) から最外縁引張鉄筋までの距離) とした。2 分法は、 x_{n-1} 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 4-1 に、2 分法の考え方を示す。

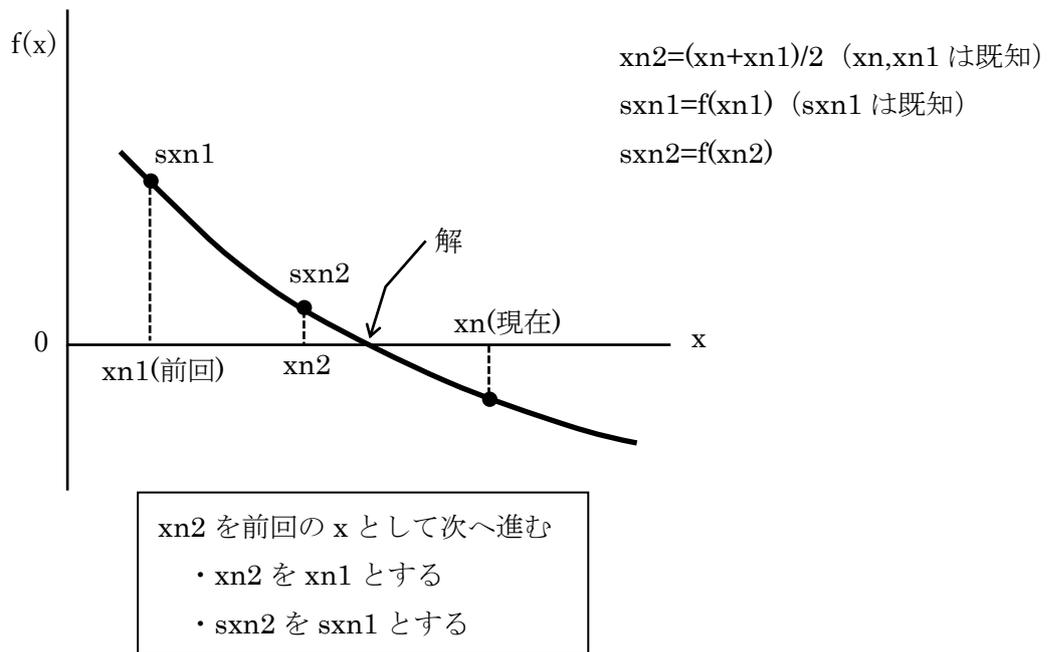
2 分法による繰り返し計算の出発時点において、図 4-1 の x_{n-1} (1 つ前の x の値)、 x_n (現在の x の値) および $s_{x_{n-1}}$ (1 つ前の $f(x)$ の値) は、既知であることを前提とする。

2 分法の求解の手順は、以下の通りである。

- ① x_{n-1} と x_n の中点の値 $x_{n2}=(x_{n-1}+x_n)/2$ を求める。
- ② x_{n2} に対する $f(x)$ の値 $s_{x_{n2}}$ と x_{n-1} に対する $f(x)$ の値 $s_{x_{n-1}}$ の符号を比較し、符号が反転した場合 x_{n-1} 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 $s_{x_{n2}}$ と x_{n-1} に対する $f(x)$ の値 $s_{x_{n-1}}$ 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_{n-1} 、 $s_{x_{n2}}$ を $s_{x_{n-1}}$ 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 $Abs((x_n-x_{n-1})/x_n)$ の値が十分に小さくなったとき(本マクロでは 10^{-5})、解を $x=(x_{n-1}+x_n)/2$ で求める。



(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 4-1 2分法の考え方

(18)終局曲げモーメントの計算

(17)で算出された中立軸位置 x を使用し、式 3.6(1)～(6)により、X 方向および Y 方向の終局曲げモーメントを求める。

(19)最外縁引張鉄筋と最外縁圧縮鉄筋の降伏判定および許容応力超過判定

終局時において、最外縁引張（圧縮）鉄筋が降伏しているかどうかを判定し、降伏情報を保存する。最外縁引張（圧縮）鉄筋のひずみを算出し、降伏ひずみを超えているかどうかを判定する。

$idy(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、 j 番目の軸力値、 i 番目の中立軸傾斜角に対する最外縁引張鉄筋の降伏情報であり、「圧縮降伏」、「引張降伏」および「未降伏」のいずれかを保存

$idy2(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、 j 番目の軸力値、 i 番目の中立軸傾斜角に対する最外縁圧縮鉄筋の降伏情報であり、「圧縮降伏」、「引張降伏」および「未降伏」のいずれかを保存

許容曲げモーメント算出時には、圧縮許容ひずみに達したときに、最外縁引張（圧縮）鉄筋が許容応力度に達しているかどうかを判定する。このとき、 $idy(icase,j,i)$ ($idy2(icase,j,i)$) には、「圧縮許容超」、「引張許容超」および「許容未満」のいずれかを保存する。

(20)中立軸位置、終局曲げモーメントおよび軸力のストア

中立軸位置、終局曲げモーメント等を、配列にストアする。

$xx(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、軸力ケース j 、中立軸傾斜角ケース i の中立軸位置（圧縮側最外縁からの距離、cm）

$momx(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、軸力ケース j 、中立軸傾斜角ケース i X 軸周り終局曲げモーメント (kNm)

$momy(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、軸力ケース j 、中立軸傾斜角ケース i Y 軸周り終局曲げモーメント (kNm)

$axi(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、軸力ケース j 、中立軸傾斜角ケース i の軸力

$alph(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、軸力ケース j 、中立軸傾斜角ケース i の中立軸傾斜角 (deg)

$xcase(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、軸力ケース j 、中立軸傾斜角ケース i の中立軸位置の CASE (1～5) [3.7 の記述を参照]

$th(icase,j,i)$: 諸元ケース $icase$ 、軸力ケース j 、中立軸傾斜角ケース i のモーメント作用方向角 (deg)

$iflag1=1$ のとき、X 方向は $b \cdot h^2 \cdot fc$ で、Y 方向は $b^2 \cdot h \cdot fc$ で除することにより無次元化表示とした (b : 断面幅、 h : 断面高さ、 fc : コンクリート強度)。

なお、モーメント作用方向角 θ は、 $\theta = \tan^{-1}(My/Mx)$ により計算した。

(21)中立軸傾斜角に関する繰り返しループ (i ループ) の終了

(22)軸力に関する繰り返しループ (j ループ) の終了

(23)中立軸傾斜角と軸力の計算数のストア

$nn(icase)$: 諸元ケース $icase$ の中立軸傾斜角の計算数

nn2(icase) : 諸元ケース icase の軸力の計算数

(24)中立軸収束状況の書き出し

シート「中立軸計算 U」(終局時 : imod=1)あるいは「中立軸計算 Y」(降伏時 : imod=2)に、中立軸位置の収束状況を書き出す。なお、書き出す諸元ケースは、ソースコード内において、フラグ num_icase で指定した諸元ケースである。

許容曲げモーメント算出時には、シート「中立軸計算 AC」(コンクリート許容時 : imod=1) あるいは「中立軸計算 AS」(鉄筋許容時 : imod=2) に中立軸位置の収束状況を書き出す。

書き出す項目は、諸元ケース、軸力ケース、中立軸傾斜角 α のステップ、収束回数、および収束に至るまでの中立軸位置の値 (収束回数分) である。

nrep(j,i) : 軸力ケース j、中立軸傾斜角ケース i の収束回数

xj(j,i,jc) : 軸力ケース j、中立軸傾斜角ケース i、繰り返し回数 jc 回目の中立軸位置

(25)諸元ケースの繰り返し計算 (icase ループ) の終了

1 つの諸元ケースの計算が終了後、(1)に戻る。

(26)終局および降伏曲げモーメントの書き出し(a)

軸力 N を固定して中立軸傾斜角 α を変化させたときの終局あるいは降伏曲げモーメント等の書き出しを、シート「M-N 関係 U(●a)」(終局時 : imod=1)あるいは「M-N 関係 U(●a)」(降伏時 : imod=2)に行う。ここに、●は、諸元ケース番号に対応する。

書き出す項目は、以下である。ただし、降伏時は「最外縁引張鉄筋降伏判定」以降は出力しない。

- ・ 諸元ケース icase
- ・ ケース説明 id_case(icase)
- ・ 軸力ケース番号 j
- ・ 軸力値 axi(icase,j,i)
- ・ 中立軸傾斜角ケース番号 i
- ・ 中立軸傾斜角 alph(icase,j,i) (deg)
- ・ CASE xcase(icase,j,i)
- ・ 中立軸位置 xx(icase,j,i) (cm)
- ・ X 方向終局曲げモーメント momx(icase,j,i) (kNm)
- ・ Y 方向終局曲げモーメント momy(icase,j,i) (kNm)
- ・ X、Y 方向を合成した終局曲げモーメント momxy momx(icase,j,i) (kNm)
- ・ モーメント作用方向角 th(icase,j,i) (deg)
- ・ 最外縁引張鉄筋の降伏判定 idy(icase,j,i)
- ・ 最外縁圧縮鉄筋の降伏判定 idy2(icase,j,i)
- ・ 釣合軸力 nd_b(icase,i) (kN)
- ・ X 方向釣合曲げモーメント momx_b(icase,i) (kNm)
- ・ Y 方向釣合曲げモーメント momy_b(icase,i) (kNm)

(27)許容曲げモーメントの書き出し(a)

許容曲げモーメントの算出時、軸力 N を固定して中立軸傾斜角 α を変化させたときの許容曲げモーメント等の書き出しを、シート「M-N 関係 A(●a)」(コンクリート許容時: imod=1、鉄筋許容時: imod=2) に行う。ここに、●は、諸元ケース番号に対応する。

書き出す項目は、以下である。ただし、鉄筋許容時は「最外縁引張鉄筋の許容応力超過判定」以降は出力しない。

- ・ 諸元ケース icase
- ・ ケース説明 id_case(icase)
- ・ 軸力ケース番号 j
- ・ 軸力値 axi(icase,j,i)
- ・ 中立軸傾斜角ケース番号 i
- ・ 中立軸傾斜角 alph(icase,j,i) (deg)
- ・ CASE xcase(icase,j,i)
- ・ 中立軸位置 xx(icase,j,i) (cm)
- ・ X 方向許容曲げモーメント momx(icase,j,i) (kNm)
- ・ Y 方向許容曲げモーメント momy(icase,j,i) (kNm)
- ・ X、Y 方向を合成した終局曲げモーメント momxy momx(icase,j,i) (kNm)
- ・ モーメント作用方向角 th(icase,j,i) (deg)
- ・ 最外縁引張鉄筋の許容応力超過判定 idy(icase,j,i)
- ・ 最外縁圧縮鉄筋の許容応力超過判定 idy2(icase,j,i)
- ・ 釣合軸力 nd_b(icase,i) (kN)
- ・ X 方向釣合曲げモーメント momx_b(icase,i) (kNm)
- ・ Y 方向釣合曲げモーメント momy_b(icase,i) (kNm)

(28)終局および降伏曲げモーメントの書き出し(b)

中立軸傾斜角 α を固定して軸力 N を変化させたときの終局あるいは降伏曲げモーメント等の書き出しを、シート「M-N 関係 U(●b)」(終局時: imod=1)あるいは「M-N 関係 U(●b)」(降伏時: imod=2)に行う。ここに、●は、諸元ケース番号に対応する。

書き出す項目は、以下である。ただし、降伏時は「最外縁引張鉄筋降伏判定」以降は出力しない。

- ・ 諸元ケース icase
- ・ ケース説明 id_case(icase)
- ・ 中立軸傾斜角ケース番号 i
- ・ 中立軸傾斜角 alph(icase,j,i) (deg)
- ・ 軸力ケース番号 j
- ・ 軸力値 axi(icase,j,i)
- ・ CASE xcase(icase,j,i)
- ・ 中立軸位置 xx(icase,j,i) (cm)
- ・ X 方向終局曲げモーメント momx(icase,j,i) (kNm)
- ・ Y 方向終局曲げモーメント momy(icase,j,i) (kNm)
- ・ X、Y 方向を合成した終局曲げモーメント momxy momx(icase,j,i) (kNm)
- ・ モーメント作用方向角 th(icase,j,i) (deg)

- ・最外縁引張鉄筋の降伏判定 $idy(icase,j,i)$
- ・最外縁圧縮鉄筋の降伏判定 $idy2(icase,j,i)$
- ・釣合軸力 $nd_b(icase,i)$ (kN)
- ・X方向釣合曲げモーメント $momx_b(icase,i)$ (kNm)
- ・Y方向釣合曲げモーメント $momy_b(icase,i)$ (kNm)

(29) 許容曲げモーメントの書き出し(b)

許容曲げモーメントの算出時、中立軸傾斜角 α を固定して軸力 N を変化させたときの許容曲げモーメント等の書き出しを、シート「M-N 関係 A(●b)」(コンクリート許容時: $imod=1$ 、鉄筋許容時: $imod=2$) に行う。ここに、●は、諸元ケース番号に対応する。

書き出す項目は、以下である。ただし、鉄筋許容時は「最外縁引張鉄筋の許容応力超過判定」以降は出力しない。

- ・諸元ケース $icase$
- ・ケース説明 $id_case(icase)$
- ・中立軸傾斜角ケース番号 i
- ・中立軸傾斜角 $alph(icase,j,i)$ (deg)
- ・軸力ケース番号 j
- ・軸力値 $axi(icase,j,i)$
- ・CASE $xcase(icase,j,i)$
- ・中立軸位置 $xx(icase,j,i)$ (cm)
- ・X方向許容曲げモーメント $momx(icase,j,i)$ (kNm)
- ・Y方向許容曲げモーメント $momy(icase,j,i)$ (kNm)
- ・X、Y方向を合成した終局曲げモーメント $momxy momx(icase,j,i)$ (kNm)
- ・モーメント作用方向角 $th(icase,j,i)$ (deg)
- ・最外縁引張鉄筋の許容応力超過判定 $idy(icase,j,i)$
- ・最外縁圧縮鉄筋の許容応力超過判定 $idy2(icase,j,i)$
- ・釣合軸力 $nd_b(icase,i)$ (kN)
- ・X方向釣合曲げモーメント $momx_b(icase,i)$ (kNm)
- ・Y方向釣合曲げモーメント $momy_b(icase,i)$ (kNm)

(30) 終局と降伏に関するループの終了

$imod=1$ (終局) の計算が終了後、 $imod=2$ (降伏) の計算に移行する (項目(1)に戻る)。

5. 試算例

5.1 松本(1984)の計算例

5.1.1 計算条件

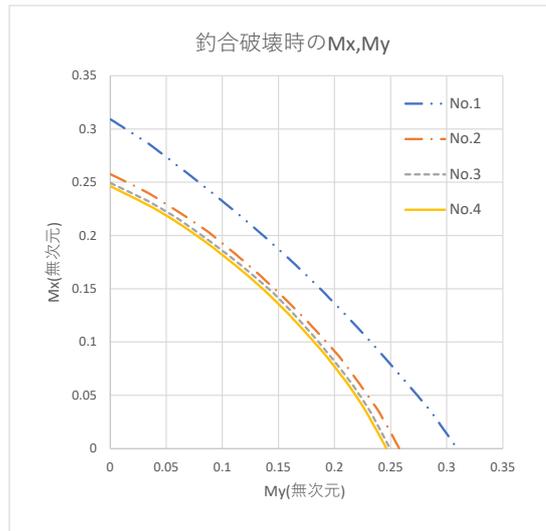
松本(1984)に記載される試算例と同一の条件を使用し、本マクロによって計算を行った。
計算ケースと使用した断面諸元を、表 5.1.1-1 に示す。

表 5.1.1-1 計算ケースと断面諸元

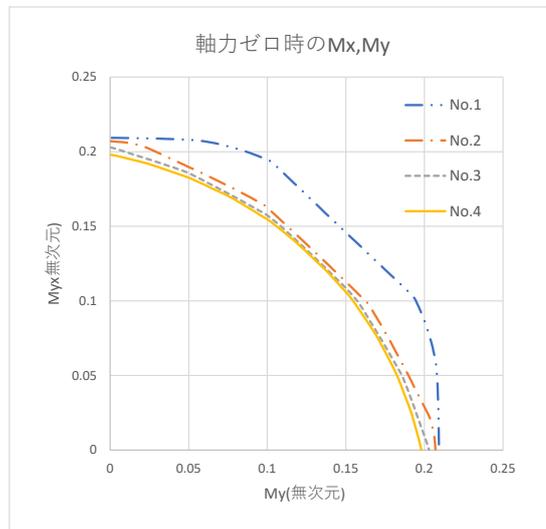
項目	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
断面幅 B(cm)	22	20	20	20
断面高さ H(cm)	22	20	20	20
鉄筋量	4×4.84cm ² (No.1) 8×2.42cm ² (No.2) 12×1.61cm ² (No.3) 24×0.81cm ² (No.4)	4×2cm ² (pt=2%) 4×4cm ² (pt=4%) 4×6cm ² (pt=6%)	4×D13	4×D13
鉄筋かぶり (cm)	2	3	3	3
鉄筋ヤング係数(kN/mm ²)	180	210	180	180
鉄筋降伏強度(N/mm ²)	378	441	378	378
コンクリート強度(N/mm ²)	30	30	20, 30, 40	30
備考	配筋の影響 P178 図 14	鉄筋比の影響 P177 図 11	コン強度の影響 P177 図 12	P176 図 10

5.1.2 本マクロによる計算結果

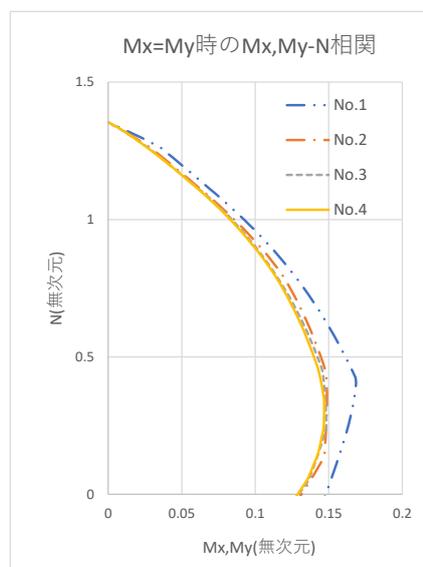
表 5.1.1-1 に示した 4 ケースの計算結果を、表 5.1.2-1~4 に示す。



(a)釣合破壊時の M_x, M_y

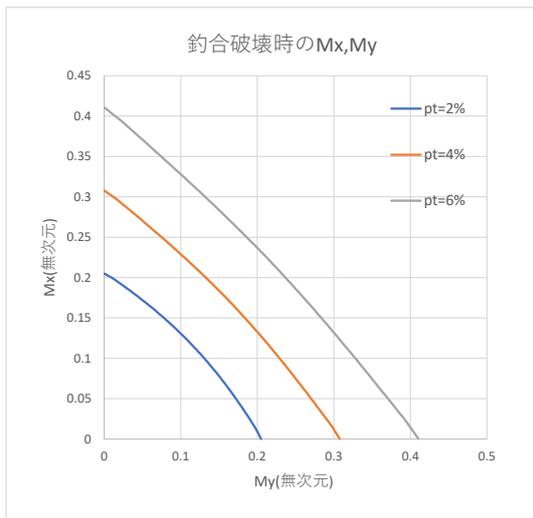


(b)軸力零時の M_x, M_y

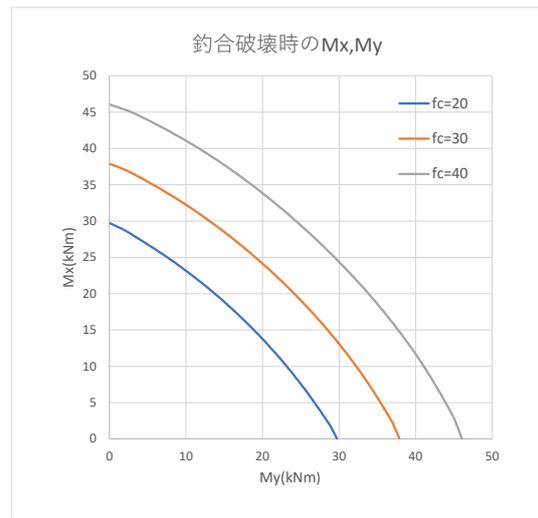


(c)軸力と曲げの相関

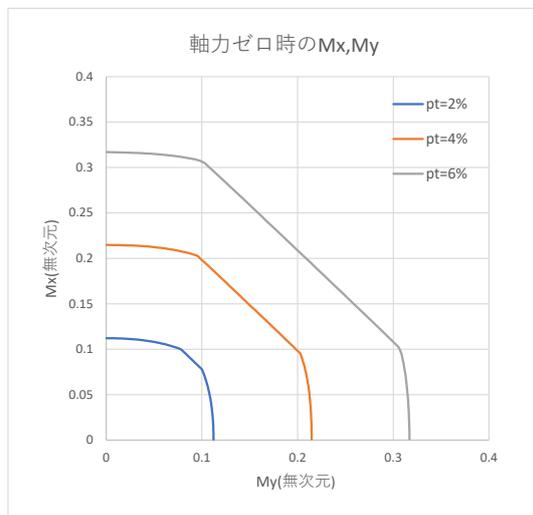
図 5.1.2-1 ケース 1 (配筋の影響)



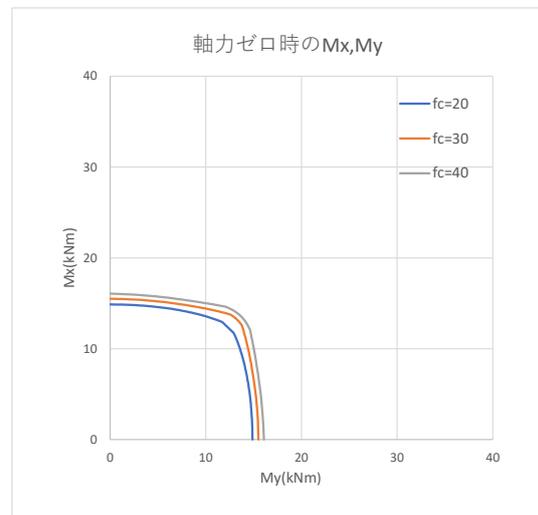
(a) 釣合破壊時の M_x, M_y



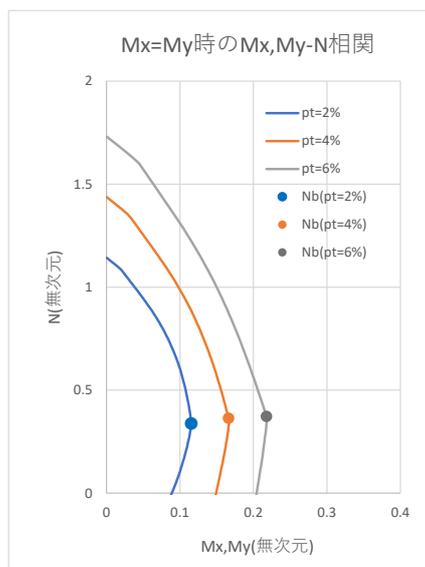
(a) 釣合破壊時の M_x, M_y



(b) 軸力零時の M_x, M_y

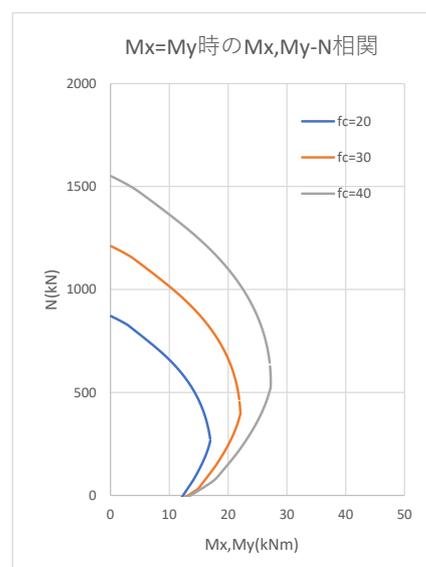


(b) 軸力零時の M_x, M_y



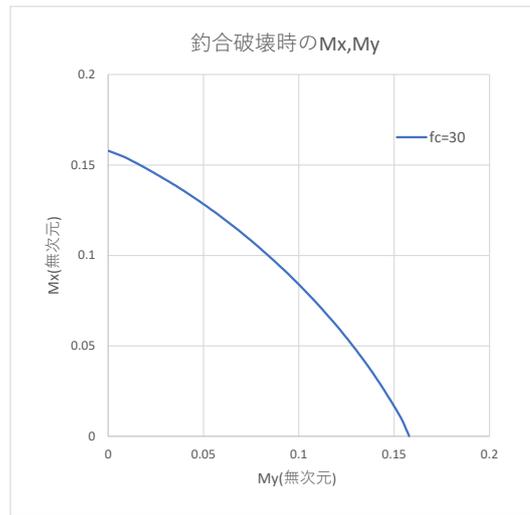
(c) 軸力と曲げの相関

図 5.1.2-2 ケース 2 (鉄筋比の影響)

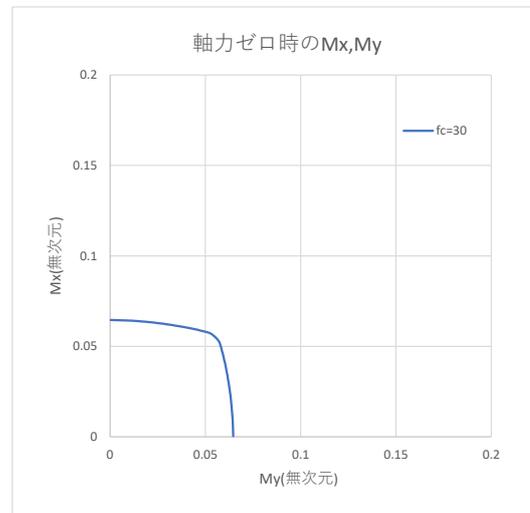


(c) 軸力と曲げの相関

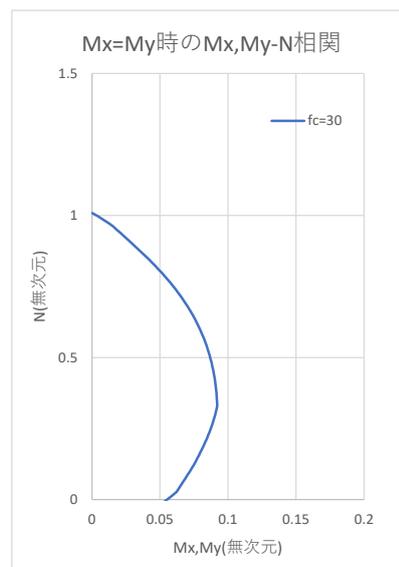
図 5.1.2-3 ケース 3 (コンクリート強度の影響)



(a)釣合破壊時の Mx,My



(b)軸力零時の Mx,My



(c)軸力と曲げの相関

図 5.1.2-4 ケース 4 (釣合破壊時 Mx,My)

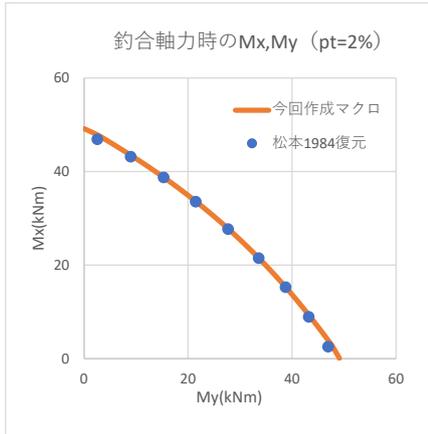
5.2 松本(1984)の復元プログラムとの比較

松本(1984)の報告には、二軸曲げ耐力を算出する BASIC プログラムのソースコードが掲載されている。以下では、そのソースコードをエクセル VBA で復元し、それによる計算結果と本報告のマクロによる結果を比較した。プログラムの復元においては、元論文のアルゴリズムや変数名には変更を加えず、入出力のみに変更・追加して、VBA プログラムを作成した。

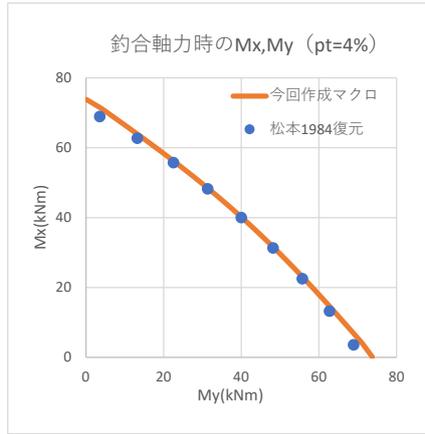
計算条件としては、先に示した表 5.1.1-1 におけるケース 2 および 3 を対象とした。

図 5.2-1 および 2 に、比較結果を示す。両者の結果がほぼ一致していることがわかる。

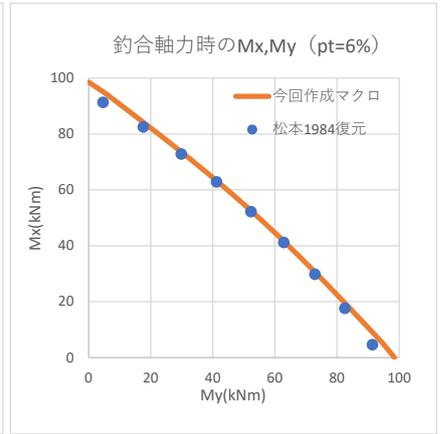
釣合軸力時の M_x および M_y に関し、復元プログラムと本マクロの結果が、 $M_x=M_y$ の位置（中立軸傾斜角 $\alpha=45^\circ$ ）から離れるにつれてやや乖離が見られるのは、釣合破壊時の外力偏心量 $eccen0$ が中立軸傾斜角 α に依存するにも拘わらず、釣合破壊時の $eccen0$ を $\alpha=45^\circ$ において決定し、その $eccen0$ に対し α を変動させて終局曲げモーメントを算出したためと考えられる。



(a1) pt=2%

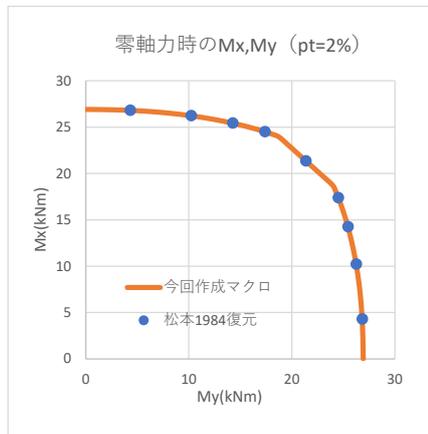


(a2) pt=4%

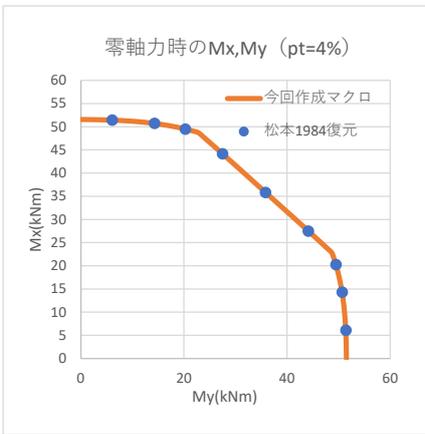


(a3) pt=6%

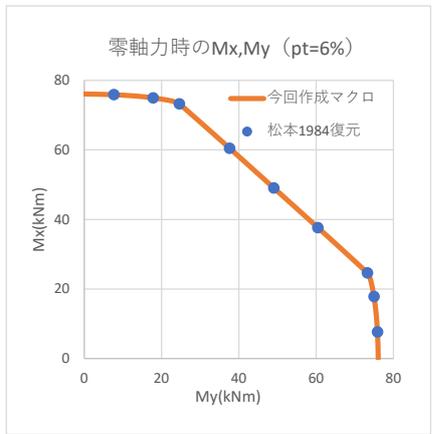
(a) 釣合軸力時の M_x と M_y



(b1) pt=2%

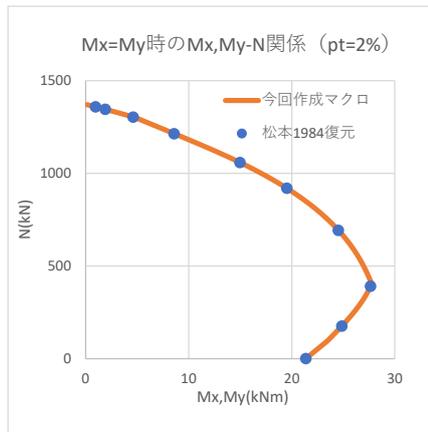


(b2) pt=4%

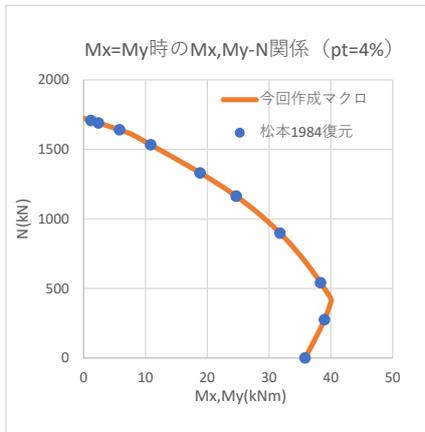


(b3) pt=6%

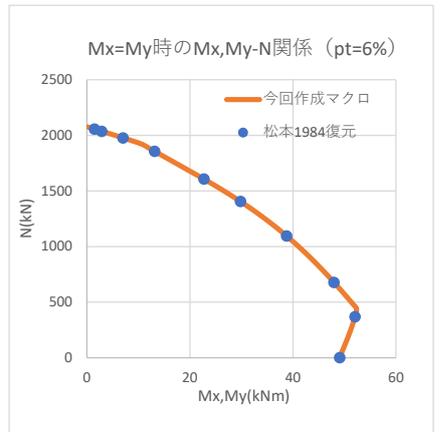
(b) 零軸力時の M_x と M_y



(c1) pt=2%



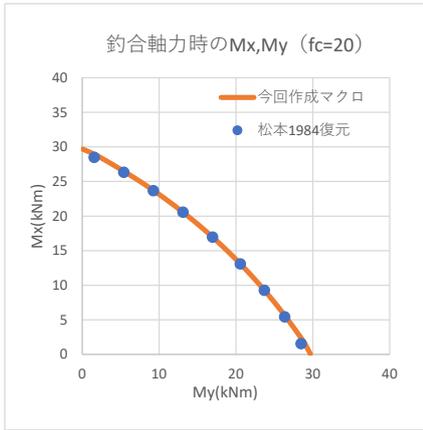
(c2) pt=4%



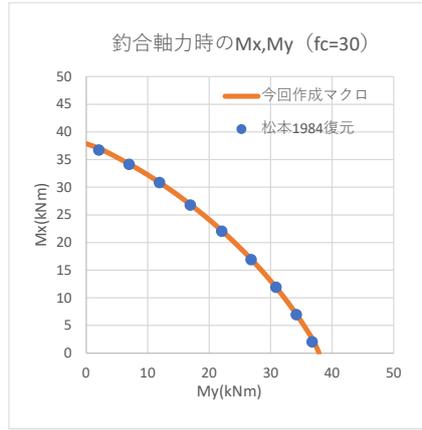
(c3) pt=6%

(c) $M_x=M_y$ 時の M_x, M_y-N 関係

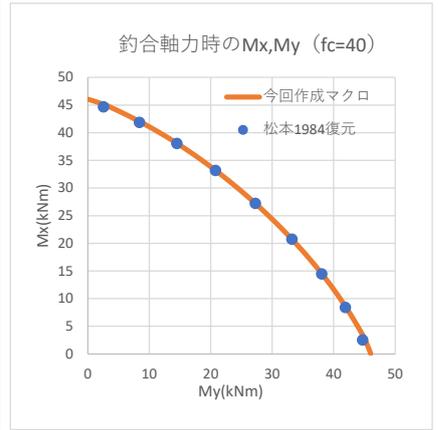
図 5.2-1 本報告のマクロと松本(1984)の復元プログラムとの比較 (ケース 2)



(a1) $f_c=20$

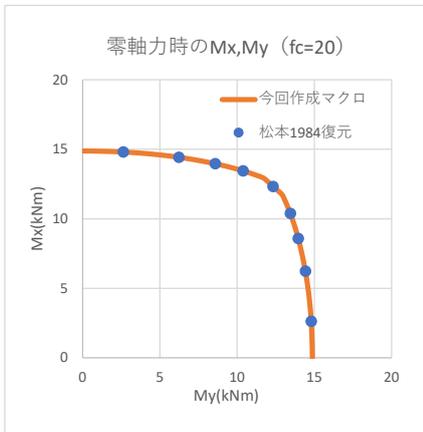


(a2) $f_c=30$

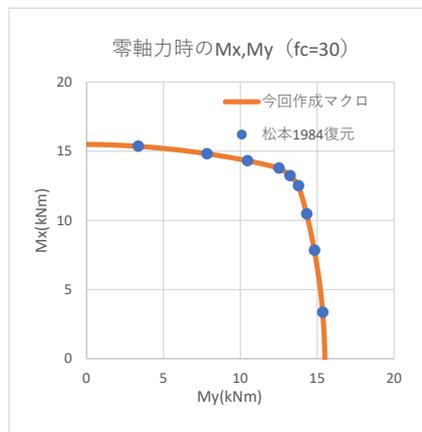


(a3) $f_c=40$

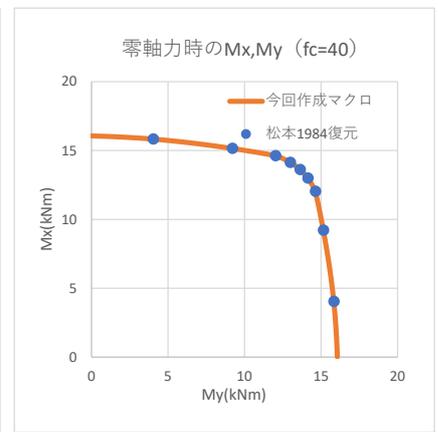
(a) 釣合軸力時の M_x と M_y



(b1) $f_c=20$

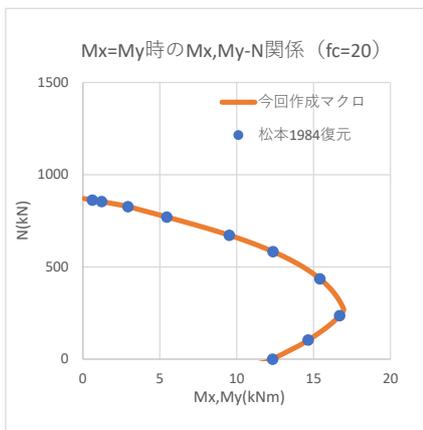


(b2) $f_c=30$

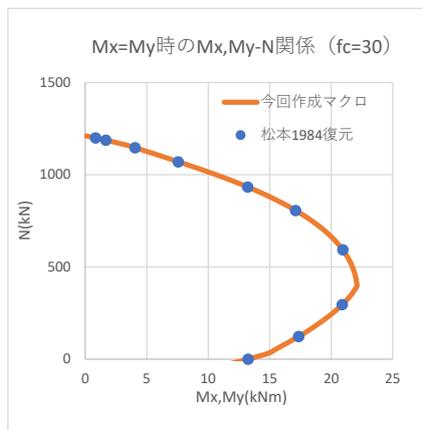


(b3) $f_c=40$

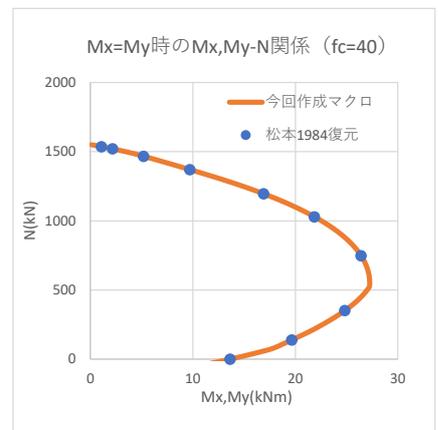
(b) 零軸力時の M_x と M_y



(c1) $f_c=20$



(c2) $f_c=30$



(c3) $f_c=40$

(c) $M_x=M_y$ 時の M_x, M_y-N 関係

図 5.2-2 本報告のマクロと松本(1984)の復元プログラムとの比較 (ケース 3)

5.3 他文献との比較

5.3.1 計算条件

「高橋雅裕・矢部正明：RC断面の2軸曲げ耐力の計算法に関する検討 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 1998年1月」（以下、文献と呼ぶ）によれば、道路橋脚断面を対象として、二軸曲げ耐力の算出が実施されている。以下では、文献と同一の断面諸元を用い、本マクロにより二軸曲げ耐力を求めた。断面諸元等の計算条件については、「土木研究センター：平成8年度耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会報告書、1997」（以下、土研センター(1997)と呼ぶ）を参照した。

表 5.3.1-1 断面諸元

項目	値	備考
断面幅 B(m)	5	
断面高さ H(m)	2.2	
鉄筋量	図 5.3.1-1 参照	
鉄筋かぶり (cm)	図 5.3.1-1 参照	
鉄筋ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	200	
鉄筋降伏強度 σ_{sy} (N/mm ²)	295	土研センター(1997) p11 より
コンクリート強度 σ_{ck} (N/mm ²)	21	同上
軸力 N(kN)	11087	土研センター(1997) p66,67 より

表 5.3.1-1 の軸力については、土研センター(1997)の記載を参照し、橋脚基部の値として、上部構造重量 $W_u=785tf$ と橋脚重量 $W_p=346.3tf$ の和 $N=W_u+W_p=1131.3tf=11087kN$ により設定した。

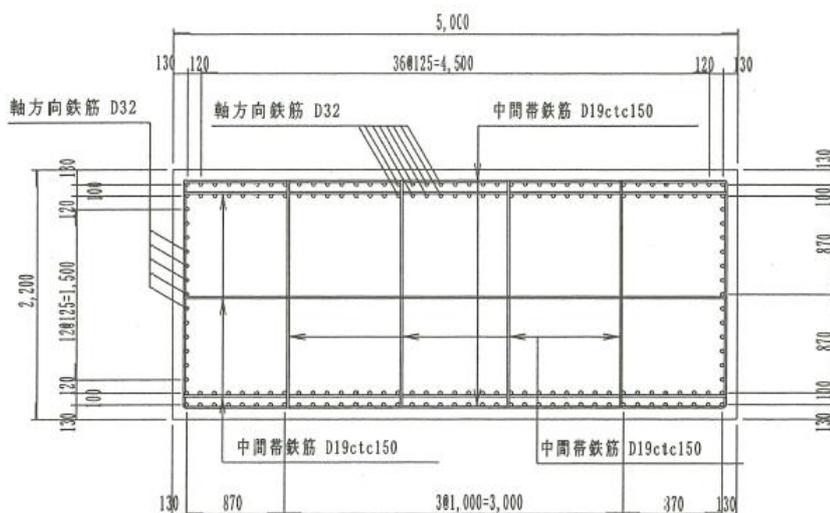


図 5.3.1-1 断面配筋図 (土研センター(1997) p.13 より)

5.3.2 計算結果

図 5.3.2-1 に、終局時および降伏時の二軸曲げ耐力 (M_x - M_y 関係) を示す。同図において、 M_x が橋軸直角方向周り (弱軸周り) の曲げモーメント、 M_y が橋軸方向周り (強軸周り) の曲げモーメントを表している。

同図には、文献に示されたグラフから目視にて読み取ったデータも併記した。本マクロの結果と文献の結果がほぼ一致していることがわかる。

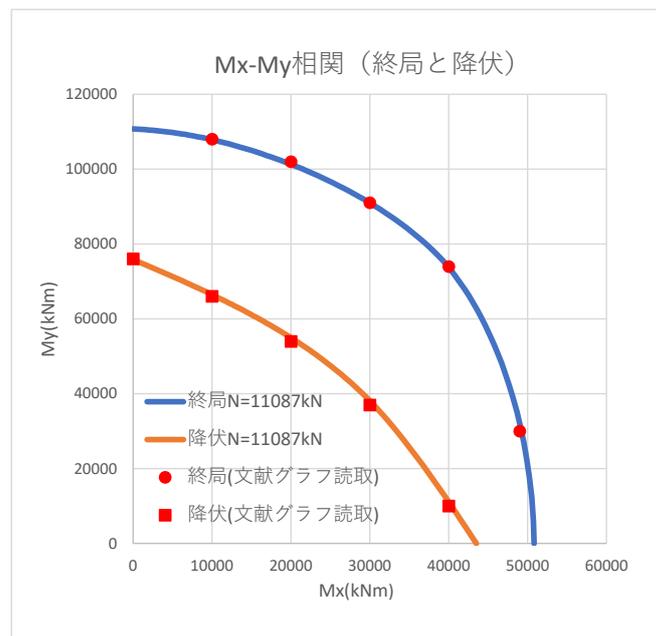


図 5.3.2-1 終局時および降伏時の二軸曲げ耐力 (M_x - M_y 関係)

5.4 一軸曲げ M-N 図作成マクロとの比較

5.4.1 計算条件

本報告の二軸曲げ耐力算出マクロにおいて、 $\alpha=0^\circ$ とした場合の一軸曲げ状態に対し、別途作成した一軸曲げの M-N 図作成マクロとの比較を実施した。

計算条件を、表 5.4.1-1 に示す。

なお、一軸曲げの M-N 図作成マクロでは、分割法を用いた解法を適用していることから、同表の計算条件には、高さ方向の分割数を示した。また、コンクリート引張強度の考慮も可能であるが、二軸曲げ耐力算出マクロと同一条件とするため、小さな引張強度を仮定した。さらに、配筋条件として圧縮側と引張側を対称とした。

一軸曲げの M-N 図作成マクロでは、鉄筋断面積をを差し引いたコンクリート断面積の設定も可能とするが、二軸曲げ耐力作成マクロと同一条件とするため、鉄筋断面積を差し引かない設定とした。

表 5.4.1-1 計算条件

諸元	値	備考
断面高さ方向の分割数	50	M-N 図作成マクロでの設定
断面の全高 (cm)	20	
断面の幅 (cm)	135	
鉄筋ヤング係数 (kN/mm ²)	200	
鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	345	
コンクリートヤング係数 (kN/mm ²)	29.5	
コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	35	
コンクリート引張強度 (N/mm ²)	0.1	M-N 図作成マクロでの設定
引張鉄筋断面積 (cm ²)	12.67 (10-D13)	
引張鉄筋かぶり (cm)	6	
圧縮鉄筋断面積 (cm ²)	12.67 (10-D13)	
圧縮鉄筋かぶり (cm)	6	
軸力の計算分割数	100	

5.4.2 計算結果

図 5.4.2-1 に、本報告の二軸曲げ耐力算出マクロと一軸曲げ耐力算出用マクロとの比較を示す。同図によれば、両者の結果は、ほぼ一致していることがわかる。

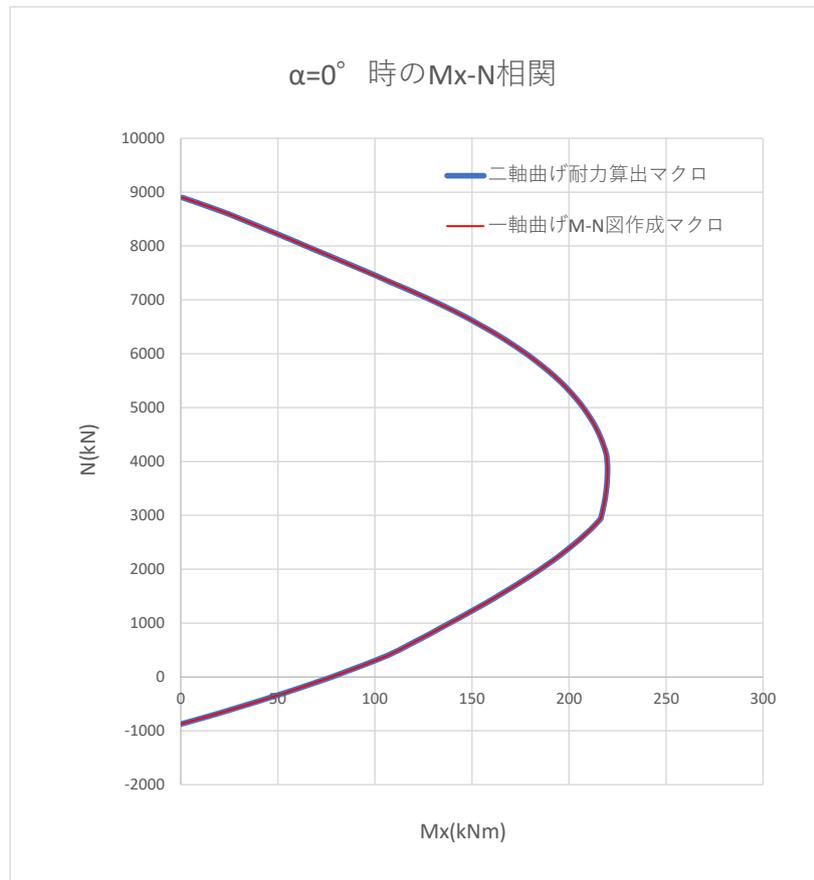
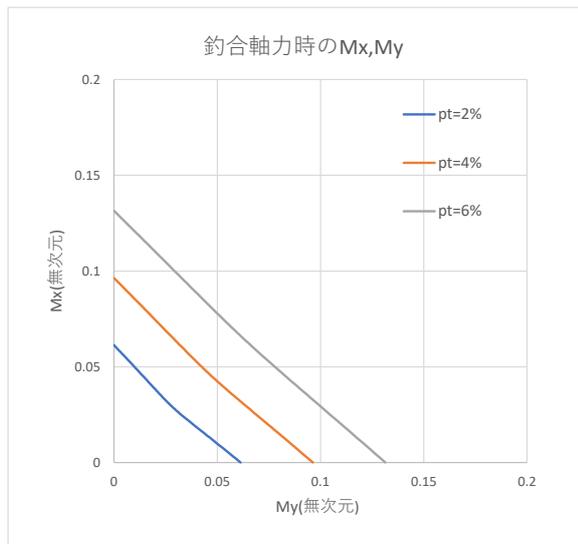


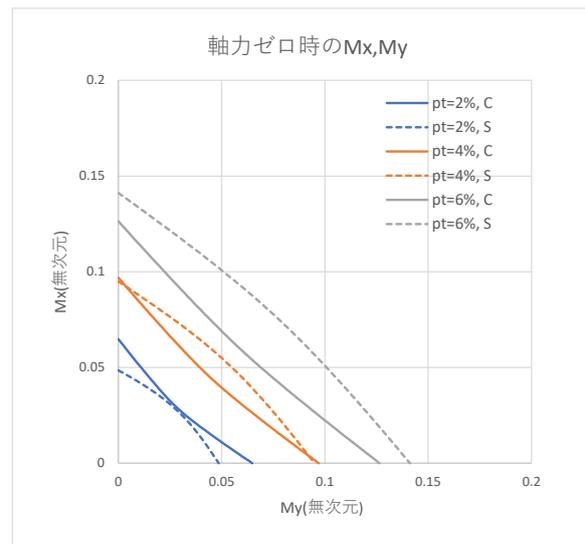
図 5.4.2-1 一軸曲げ耐力算出用マクロとの比較

5.5 許容曲げモーメントの計算例

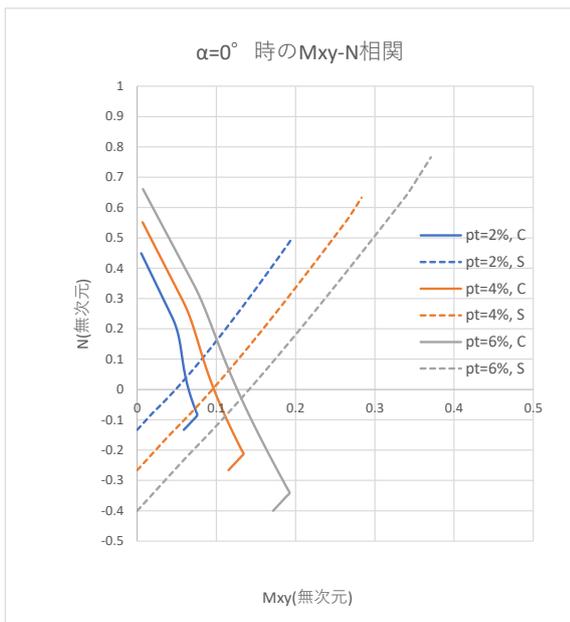
コンクリートあるいは鉄筋が許容応力度に達するときの曲げモーメント、すなわち許容曲げモーメントの計算例を、図 5.5-1 に示す。計算条件は、表 5.1.1-1 のケース 2 とした。ここに、釣合軸力時とはコンクリートが許容応力度に達したと同時に鉄筋が許容応力度に達する軸力に対する曲げモーメントを示す。また、許容 C はコンクリートが許容応力度に達する場合を、許容 S は鉄筋が許容応力度に達する場合を示す。図 5.5-1(c)および(d)の M_{xy} - N 関係によれば、曲げモーメントと軸力の関係に終局耐力時と同様の傾向が見られる。軸力が小さいときには、先に鉄筋が許容応力度に達するのに対し、軸力が大きくなると先にコンクリートが許容応力度に達することがわかる。



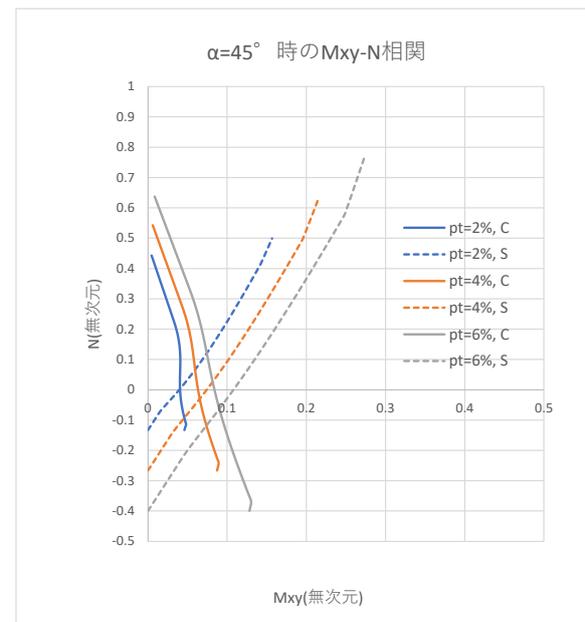
(a) 釣合軸力時



(b) 零軸力時



(c) $\alpha = 0^\circ$ 時の M_{xy} - N 関係



(d) $\alpha = 45^\circ$ 時の M_{xy} - N 関係

図 5.5-1 許容曲げモーメントの計算例

【参考文献】

- (1)松本進：軸力・二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の弾塑性解析方法、鹿児島大学工学部研究報告、第26号、p.171～184、1984年5月
- (2)高橋雅裕・矢部正明：RC断面の2軸曲げ耐力の計算法に関する検討、第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、p.171～174、1998年1月
- (3)土木研究センター：平成8年度耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会報告書、1997年5月
- (4)土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書、設計編、2018年3月