

1. はじめに

多段配筋や矩形以外の断面形状に対応するため、「分割法による RC 断面の $M\phi$ 計算」のエクセルマクロを掲載しましたが、実際の耐震照査や耐震解析においては、 $M\phi$ 関係の限界値（降伏点や終局点など）だけが必要になることが多いと思います。また、 $M\phi$ 関係を初期から終局に至るまで全て算出しようとする、計算時間もかかります。そこで、 $M\phi$ 関係の限界値のみを求めるマクロを別途作成しました。なお、今回のものは矩形断面に対応できるものです。

エクセルシートを添付していますので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については、使用者に帰するものとします。また、ソースコードについても公開しています。

2. エクセルシートの内容

①部材高さや幅、配筋条件などの断面諸元を入力し、また横拘束筋に関する条件を入力することで、ひび割れ、初期降伏、引張限界（引張許容ひずみ時）および圧縮限界における曲率および曲げモーメントを出力するエクセルマクロです。

②コンクリート圧縮限界ひずみ、および鉄筋引張許容ひずみの算出は、道路橋示方書・耐震設計編（H24 版）に基づいています。

③複数ケースの計算に対応するために、入力データをケースごとに 1 行で入力し、 $M\phi$ 限界値の出力も 1 ケースに 2 行ずつ（正側および負側）の出力になっています。

3. 入力データおよび出力データ

①入出力に関するエクセルシートは 4 つあり、「入力データ 1」、「入力データ 2」、「限界値」および「断面分割」です。「入力データ 1」と「入力データ 2」に必要なデータを入力すれば、「限界値」に $M\phi$ 限界値が出力されます。

②「入力データ 1」には、「ケース」、「全高(cm)」、「分割数」、「幅(cm)」、「コンクリート強度(N/mm²)」、「鉄筋仕様」、「上筋 1 段目の呼び径、本数およびかぶり(cm)」、「上筋 2 段目の呼び径、本数およびかぶり(cm)」、「下筋 1 段目の呼び径、本数およびかぶり(cm)」、「下筋 2 段目の呼び径、本数およびかぶり(cm)」、「側方鉄筋の呼び径、本数および段数」、および「軸力(kN)」を入力します。ここで側方鉄筋の本数は断面幅方向の数で段数は断面高さ方向の数を表します。さらに、上筋 2 段目と下筋 2 段目の間を(段数+1)の数で等間隔に分割して配置されるものとします。「上筋」および「下筋」は正曲げモーメントが作用したときの圧縮側配筋および引張側配筋を表しています。

③「入力データ 2」には、「ケース」、「横拘束筋呼び径」、「横拘束筋有効長(cm)」、「横拘束筋ピッチ(cm)」、「断面形状」、「軸方向筋呼び径」、「 L_p 算出の軸方向筋本数」、「 L_p 算出の横拘束筋有効長(cm)」、「 L_p 算出のかぶり(cm)」および「橋脚高さ(m)」を入力します。ここで、「横拘束筋有効長」や「 L_p (塑性ヒンジ長)算出時の軸方向筋本数、横拘束筋有効長」などの設定方法は、道路橋示方書・耐震設計編（H24 版）や「道路橋の耐震設計における鉄筋コンクリート橋脚の水平力ー水平変位関係の計算例（H24 版道示対応）（社）日本道路協会 橋梁委員会 耐震設計小委員会 平成 24 年 5 月」を参照してください。

④「限界値」には、ケースごとにひび割れ時、初期降伏時、引張許容ひずみ時（耐震性能 2）、引張許容ひずみ時（耐震性能 3）および圧縮限界時における曲率 (1/m)、曲げモーメント (kNm) および中立軸位置 (cm) が出力されます。各ケースで正側と負側の 2 つの $M\phi$ 関係を出力します。負側の $M\phi$ 関

係は圧縮側と引張側の軸方向筋を逆転させて $M\phi$ 関係を計算しています。圧縮側と引張側で配筋が対称になる場合には絶対値が同一の結果となりますが、両方を出力しています。

⑤「断面分割」には、分割法により断面高さ方向に分割した小断面のデータと鉄筋のデータを出力しています。各ケースで2種の出力がありますが、正および負曲げモーメントに対応するものです。番号の小さい方から大きい方に向かって、引張縁から圧縮縁に向かう出力となります。

4. $M\phi$ 限界値計算

① $M\phi$ 限界値の計算方法は、鉄筋の降伏ひずみ、鉄筋の引張許容ひずみ、コンクリートの圧縮限界ひずみなど、ひずみの限界値をもとに曲率を算出し、その曲率における中立軸位置を、直応力の力の釣り合いにより求め、さらにモーメントの釣り合いから抵抗曲げモーメントを求めるものです。ひずみの限界値から曲率を算出する際に、中立軸位置が既知であると仮定する必要があり、以下の式により限界時曲率を算出します。

$$\text{鉄筋降伏時： } \phi_y = \frac{f_y}{E_s} \frac{1}{h - x - cv_{t1}}$$

$$\text{引張許容ひずみ時： } \phi_{ut} = \frac{\varepsilon_{ut}}{h - x - cv_{t1}}$$

$$\text{圧縮限界ひずみ時： } \phi_{uc} = \frac{\varepsilon_{uc}}{x - cv_{c1}}$$

ここに、 ϕ_y ：鉄筋降伏時の曲率

f_y ：鉄筋降伏強度

E_s ：鉄筋ヤング係数

h ：部材高さ

x ：中立軸位置

cv_{t1} ：引張側かぶり

ϕ_{ut} ：引張許容ひずみ時の曲率

ε_{ut} ：引張許容ひずみ

cv_{c1} ：圧縮側かぶり

ϕ_{uc} ：圧縮限界ひずみ時の曲率

ε_{uc} ：圧縮限界ひずみ

②ひび割れ時の $M\phi$ 限界値の計算方法は、「分割法による RC 断面の $M\phi$ 計算」と少し異なっています。本マクロでは、道路橋示方書・耐震設計編（H24 版）に方法に従い、ひび割れ時の抵抗曲げモーメントを換算断面 2 次モーメントおよび換算断面積により算出し、その値を用いてひび割れ時の曲率を求めています。一方、先の「分割法による RC 断面の $M\phi$ 計算」では、道示・耐震編のコンクリート応力ひずみ関係（圧縮側）を前提として力およびモーメントの釣り合いからひび割れ時曲率および曲げモーメントを算出しています。

本マクロでのひび割れ時の $M\phi$ 限界値計算は、以下の式に従っています。

$$\text{ひび割れ時曲げモーメント： } M_c = \left(\frac{N}{A_c} + f_t \right) \cdot W_c$$

$$\text{ひび割れ時曲率} : \phi_c = \frac{M_c}{E_c I_c}$$

ここに、 M_c : ひび割れ時曲げモーメント

N : 軸力

A_c : 鉄筋の断面積を考慮した換算断面積

f_t : コンクリート引張強度

W_c : 鉄筋断面積を考慮した換算断面係数

ϕ_c : ひび割れ時曲率

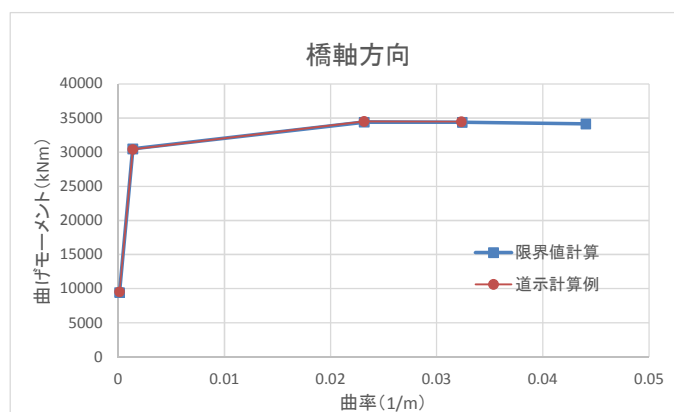
E_c : コンクリートヤング係数

I_c : 鉄筋の断面 2 次モーメントを考慮した換算断面 2 次モーメント

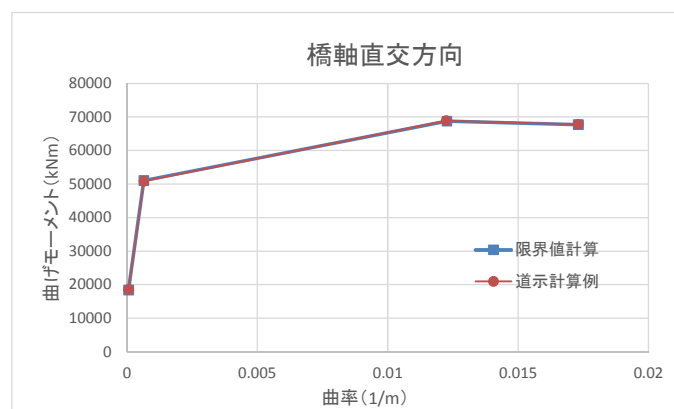
5. 計算例

計算例としては、「道路橋の耐震設計における鉄筋コンクリート橋脚の水平力ー水平変位関係の計算例 (H24 版道示対応) (社) 日本道路協会 橋梁委員会 耐震設計小委員会 平成 24 年 5 月」(以下「道示計算例」と呼ぶ) に示される断面諸元を用いています。

エクセルシートに $M-\phi$ 曲線を示していますが、本マクロによる結果が「道示計算例」の結果とほぼ一致していることがわかります。



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直交方向

図 1 $M-\phi$ 関係