

R C断面の2軸曲げ耐力の計算法に関する検討

高橋雅裕・矢部正明

正会員（株）長大 技術開発事業本部 構造防災部（〒305 茨城県つくば市春日3-22-6）

1. まえがき

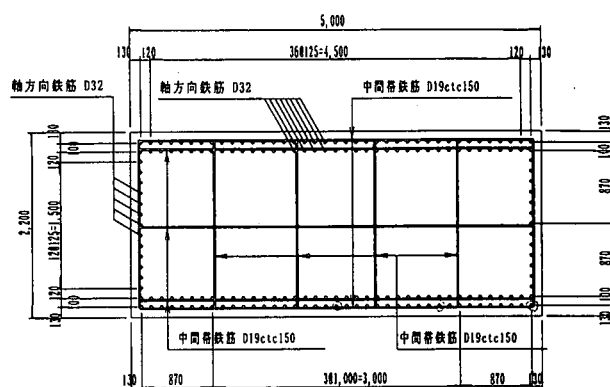
R C断面に2方向の曲げモーメントが作用する場合の曲げ耐力に関する研究は土木分野では少なく、実用的な方法はまだ提案されていない。しかし、曲線橋を支持するR C橋脚のように、2方向の曲げモーメントが作用する影響を無視できない構造もある。

道路橋示方書V耐震設計編¹⁾では、軸力と1方向の曲げモーメントを受ける場合のR C断面の曲げ耐力の算出法が示されている。後述するように、軸力と1方向の曲げモーメントを受ける場合の曲げ耐力は、軸力のつりあいと曲げモーメントのつりあいという2つの条件式より中立軸の高さと曲率を求め、その2つの量より断面内のひずみ分布を定めている。これに対して、軸力と2方向の曲げモーメントを受ける場合は、軸力のつりあいと2方向の曲げモーメントのつりあいという3つの条件式より中立軸の高さと曲率および中立軸の傾きを求め、その3つの量より断面内のひずみ分布を定めている。このように、2方向の曲げモーメントを受けるR C断面の中立軸は、図心軸に対して傾きを持つために、降伏を定義する鉄筋の位置によって、降伏曲げ耐力が大きく異なることになる。また、拘束効果をどのような形で2軸曲げ耐力の算定の中に取り入れたら良いかも不明である。

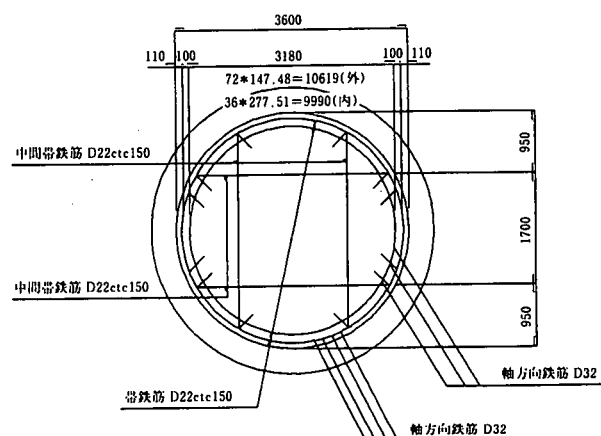
本報告は、R C断面の2軸曲げ耐力を算出する際に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係、降伏を定義する鉄筋の位置、R C断面の形状、軸力の大きさが、R C断面の2軸曲げ耐力に与える影響を検討した。

2. 解析対象としたR C橋脚の断面

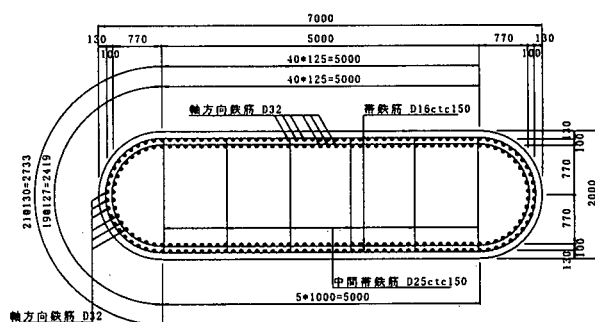
図-1に示すような矩形、円形、小判形の3つの断面形状を対象とした。これらは地盤条件、基礎型式、上部構造条件を同じものとし、R C橋脚躯体の断面形状のみを変えた条件で試設計されたものである²⁾。



(a) 矩形断面



(b) 円形断面



(c) 小判形断面

図-1 解析対象としたR C断面

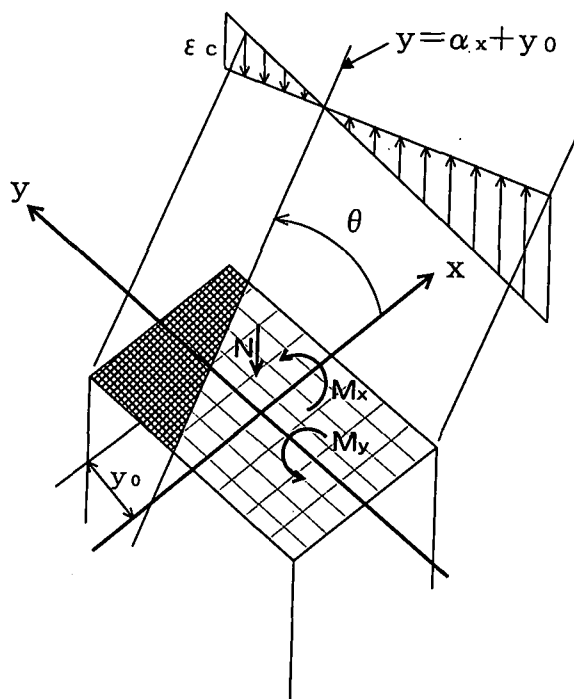


図-2 軸力と2軸曲げを受けるRC断面の
曲げ耐力算定の概念図

3. RC断面の2軸曲げ耐力の算出方法³⁾

1方向の曲げモーメントを受ける場合の曲げ耐力算出
方法と同様に、平面保持の仮定のもとに2方向の曲げモ
ーメントを受ける場合の曲げ耐力を算出した。

図-2に示すように、2軸曲げの場合には、軸力 N の
つりあい、 x 軸回りのモーメント M_x のつりあい、 y 軸
回りのモーメント M_y のつりあいの3つの条件式があり、
中立軸の高さ y_0 、中立軸の傾き θ 、曲率 ϕ （ある位置
のひずみを定めることと等価）の3つの変数によって断
面内のひずみ分布が定まる。

軸力が与えられている場合に降伏時あるいは終局時の
曲げ耐力を算出する事を考える。この場合は、降伏ある
いは終局を判定する位置のひずみが与えられるので、中
立軸の高さ y_0 、中立軸の傾き θ の2つの変数によって
ひずみ分布を定める事が出来る。さらに、中立軸の傾き
 θ を条件として固定すれば、中立軸の高さ y_0 の1つ
の変数によってひずみ分布が定まる。以下に具体的な算出
手順を示す。

- 1) 断面を格子状の微小要素に分割し、各要素の中心の
座標と断面積を求める。
- 2) 中立軸の高さ y_0 を仮定して、平面保持の仮定のも
とに各要素のひずみを求め、そのひずみから各要素
の応力度を算出する。
- 3) 応力分布から断面全体に作用する軸力を求め、それ
が条件として与えられた軸力に等しいかどうかの判
定を行う。軸力のつりあいを満たさない場合は、中

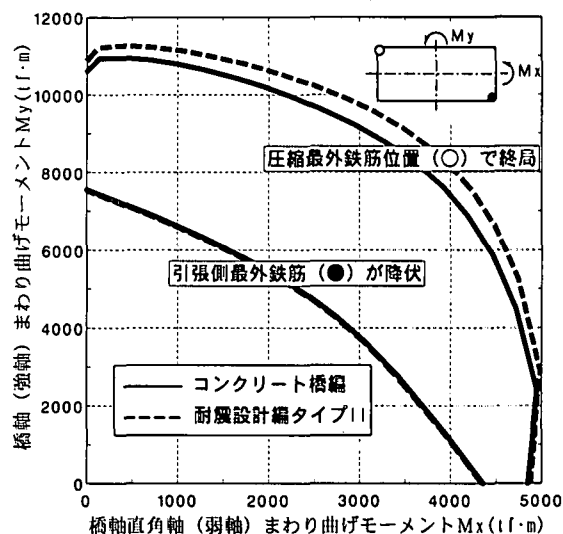


図-3 応力-ひずみ関係の違いによる比較

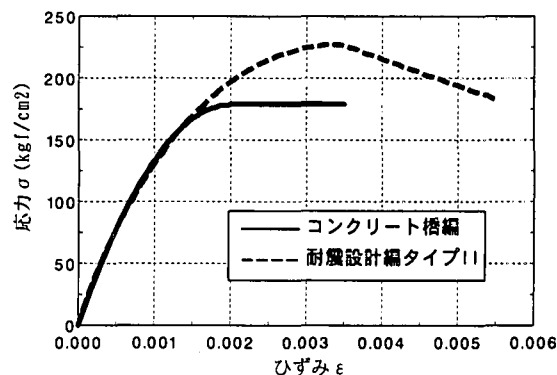


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

立軸の高さ y_0 を仮定し直して再度計算する。

以上の様にして中立軸の高さ y_0 が定まった後に、2
方向の曲げモーメントを求めれば、その組み合わせ
が耐力曲線上の1点を表す。中立軸の傾き θ を変えて
幾つかの点を求めれば、2軸曲げの耐力曲線が描ける。

ここでは、断面の分割を、矩形断面は 100×44 分
割とし、小判形断面は矩形部分を 100×40 分割、円
形部分を半径方向 $20 \times$ 円周方向 60 分割とした。また、
円形断面は、軸対称断面であるために中立軸の向き
が図心軸の向きと同じになり、曲げ耐力が曲げモー
メントの作用方向に依らないため、スライス状に 100
分割して軸力と1方向の曲げモーメントを受けるR
C断面として曲げ耐力を算出した。

4. 応力-ひずみ関係の違いによる比較

図-3は、矩形断面において、コンクリートの応力-
ひずみ曲線に道路橋示方書のコンクリート橋編の式を用
いた場合と耐震設計編のタイプII地震動に対する式を用
いた場合の、2軸曲げ耐力曲線 M_x - M_y の比較を示した

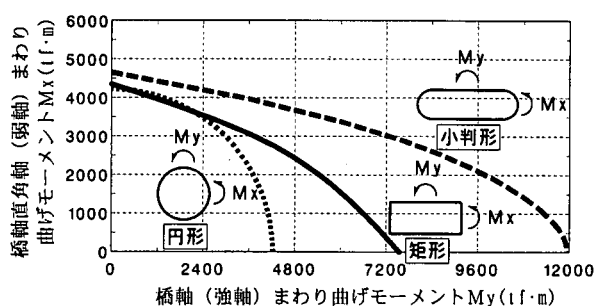


図-5 断面形状の違いによる比較

ものである。図-4に、耐力算出に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係を示した。耐震設計編の式における有効長は、横拘束筋の有効長が橋軸方向に870mm、橋軸直角方向に1000mmとなることから、ここでは1000mmとした。図中の横軸は弱軸回りの曲げモーメント M_x 、縦軸は強軸回りの曲げモーメント M_y である。耐力曲線は、引張側の最も外側の鉄筋（●）が降伏する時と圧縮側の最も外側の鉄筋位置（○）でコンクリートが終局に達する時について、2方向の曲げモーメントの相関を示している。

図より、応力-ひずみ関係の違いが降伏耐力に与える影響が小さいのに対し、終局耐力は耐震設計編の式を用いた方が、コンクリート橋編の式を用いた場合よりも5%程度大きくくなっているのがわかる。降伏耐力の違いがほとんど現れないのは、降伏耐力の算出においては引張側の最も外側の鉄筋位置（●）におけるひずみを鋼材の降伏ひずみに固定して中立軸の位置と傾きを求めているが、そのときのコンクリートのひずみが図-4に示した応力-ひずみ曲線において両者の値がほぼ一致している領域にあるからである。一方、終局耐力が耐震設計編の式を用いた時に大きくなったのは、終局耐力の算出においては圧縮側の最も外側の鉄筋位置（○）におけるひずみをコンクリートの終局ひずみに固定して中立軸の位置と傾きを求めているが、耐震編の式を用いた方が、横拘束筋の拘束効果を考慮しているために終局ひずみが6割程度大きく、終局ひずみの近くでは応力値が最大で3割程度大きいからである。

また、終局耐力に関して、中立軸の向きが断面の主軸の向きに一致するときに、中立軸の向きが断面の主軸の向きから少し離れた場合よりもやや小さくなっていることがわかる。これは、終局耐力算出時にひずみがコンクリートの終局ひずみよりも大きい部分はかぶりコンクリートが剥落すると仮定しており、中立軸の傾きが主軸の向きに一致しない場合には圧縮縁の角の部分のみが剥落するのに対し、主軸の向きに一致する場合には圧縮縁の全体にわたってかぶりコンクリートが剥落するためと考えられる。

5. 断面形状の違いによる比較

図-5は、矩形、円形、小判形の3つの断面に対して、引張側最外縁鉄筋の降伏時における2方向曲げの相関曲線 M_x - M_y を示したものである。図中の実線は矩形断面、破線は小判形断面、点線は円形断面の場合をそれぞれ示している。ただし、円形の場合は、曲げ耐力が曲げモーメントの作用方向によらないので相関曲線は円形である。

図より、弱軸回りの降伏曲げモーメント M_x は断面形状による違いが小さいが、強軸回りの降伏曲げモーメント M_y は小判形が大きく円形が小さい結果となっている。これは、3つの断面で断面の高さの差が小さいのに対して、幅が円形、矩形、小判形の順に大きくなっており、弱軸回りの曲げ耐力には断面の高さ、強軸回りの曲げ耐力には断面の幅が大きく影響するからである。

また、断面形状によって、相関曲線の形状が異なっていることがわかる。具体的には、円形断面は相関曲線が円形であるのに対し、矩形断面は図の横軸と縦軸の近くで直線的な形状となっている。小判形断面は、相関曲線が図の縦軸の近くでは直線的で、横軸に近づくにつれて曲線的になっている。その理由として、降伏時を引張側の最も外側の鉄筋が降伏した時と定義しているが、その位置が矩形断面では常に角の鉄筋なのに対し、円形断面と小判形断面では円周方向に移動することが考えられる。さらに、中立軸によって切られた部分の形状が、円形断面では中立軸の向きに依らないのに対して、矩形断面では中立軸の向きが断面の対角線に近い場合に三角形に近い形状になり、小判形断面では曲げモーメントの方向が強軸回りに近い場合に圧縮縁と引張縁で半円形に近い形状となることが理由として考えられる。

6. 降伏定義位置の違いによる比較

図-6は、矩形断面において、A, B, Cの3箇所の鉄筋がそれぞれ引張側で降伏するときの2方向曲げの相関曲線 M_x - M_y を示したものである。図中の実線はAの鉄筋、破線はBの鉄筋、点線はCの鉄筋が降伏するときの耐力曲線をそれぞれ示している。2方向の曲げモーメント M_x , M_y の向きを図のようにとった場合、 M_x と M_y が共に正の領域は断面の左上が圧縮縁となる状態、 M_x が負で M_y が正の領域は断面の左下が圧縮縁となる状態、 M_x が正で M_y が負の領域は断面の右上が圧縮縁となる状態、 M_x と M_y が共に負の領域は断面の右下が圧縮縁となる状態をそれぞれ意味する。

まず、 M_y が0の時には、3つの曲線が交わっているが、これは中立軸から3箇所の鉄筋までの距離が等しいために、それらの鉄筋が同時に降伏することを意味する。

また、 M_y が正の時には、断面の左側が圧縮領域とな

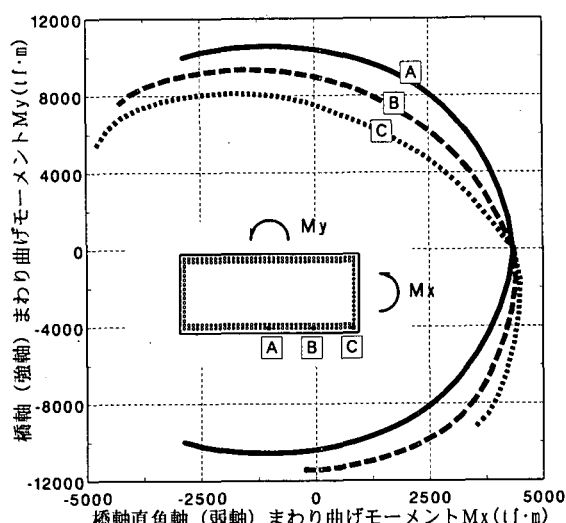


図-6 降伏定義位置の違いによる比較

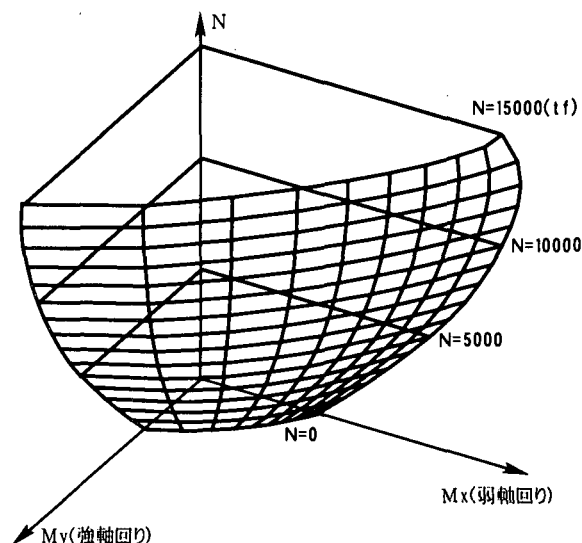


図-7 軸力と2軸曲げ耐力の相関関係

り、曲げモーメントを増加させた時、中立軸からの距離が最も遠いCの鉄筋が最初に降伏し、次にB、Aの鉄筋が順次降伏する。そのため、降伏曲げ耐力もCの鉄筋が降伏する時が最も小さく、Aの鉄筋が降伏する時が最も大きくなっている。そして、Aの鉄筋が降伏するときの曲げモーメントはCの鉄筋が降伏するときの曲げモーメントに対して最大で4割程度大きくなっている。

一方、Myが負の時には、断面の右側が圧縮領域となり、降伏曲げ耐力はMyが正の時とは逆に、Aの鉄筋が降伏する時が最も小さく、Cの鉄筋が降伏する時が最も大きくなっている。

また、Aの鉄筋は断面の対称軸上にあるために、耐力曲線が図の横軸に対して対称な形状になっている。

7. 軸力と2軸曲げ耐力の相関関係⁴⁾

図-7は、矩形断面の引張降伏時における2方向の曲げモーメントと断面に作用する軸力との相関曲面を示したものである。水平軸がそれぞれ弱軸回りと強軸回りの曲げモーメント、鉛直軸が軸力を示している。図より、ある軸力までは軸力の増加に伴って耐力が増加するが、それより高軸力になると逆に耐力が減少する事がわかり、1軸曲げの場合と同様の傾向を示している。また、2方向曲げのMx-My相関曲線の形状は、軸力によってそれほど変わっていない。

8. まとめ

RC断面に2方向の曲げモーメントが作用する場合の曲げ耐力を、1方向の曲げモーメントを受ける場合の曲げ耐力算出方法と同様に、平面保持の仮定のもとに算出し、応力-ひずみ関係、断面形状、降伏を定義する鉄筋

の位置、軸力が曲げ耐力に与える影響について検討した。その結果、以下のようなことがわかった。

- 1) コンクリートの応力-ひずみ曲線の違いが耐力に与える影響は、降伏耐力では小さく終局耐力で大きくなる。
- 2) 断面形状が違うと、相関曲線の形状が異なる。
- 3) 降伏定義位置を変えた解析では、引張最外鉄筋が降伏してから断面中央の鉄筋が降伏するまでに、曲げモーメントが最大4割程度まで増加する結果となった。

- 4) 軸力と曲げモーメントの相関関係は1軸曲げの場合と同じ様な傾向を示し、軸力を変えても2方向曲げモーメントの相関曲線はほぼ同じ形状となった。

ここで報告した内容は、(財)土木研究センター内に設置された耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会(座長：川島一彦東京工業大学教授)で検討されたものの一部である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、1996。
- 2) 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。
- 3) 田辺忠顕、檜貝 勇、梅原秀哲、二羽淳一郎：コンクリート構造、朝倉書店、1992。
- 4) F.A.Zahn, R.Park, and M.J.N.Priestley: "Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending," *ACI Structural Journal*, V.56, No.2, Mar.-Apr. 1989, pp.123-131.