

WebLesson : # 1

曲げモーメントを受ける部材の力学特性

-断面の耐荷力と変形性能-

はじめに

曲げモーメントを受ける部材の力学挙動は、鉄筋コンクリート構造学の出発点である。ここでは、先ず、RC部材の弾性解を確認し、荷重初期から終局に到るまでの非線形特性を整理する。次に、断面の変形特性である $M \sim f$ 関係を、数値シミュレーションによって説明し、曲げ耐力と靱性率の関係も考察する。併せて、断面靱性率（曲率靱性率）を考察し、これは鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能の評価に際してきわめて重要となる。

1. 曲げを受ける部材の弾性挙動

まずは、図1のような単純な構造物（単柱形式の柱や単純梁）の変形を見てもらいたい。これらの弾性挙動として、曲げモーメント M に比例して湾曲し、これを曲率(curvature) f と呼ぶ。これらの関係は、よく知られた、

$$\text{曲げモーメント - 曲率関係} : f = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

によって関係付けられる。ここで、 E =弾性係数（ヤング率）、 I =断面 2 次モーメント、したがって、 EI =曲げ剛性、として定義される、このとき、断面には曲げ応力 s が発生し、これは、図2のように図化される。このときの応力分布は線形分布し、下式にて表される。

$$\text{断面の応力分布} : s(y) = \frac{M}{I} y \quad (2)$$

弾性時には、断面の応力（または、ひずみ）は、線形分布となり、いわゆる平面保持の原理が成立している。

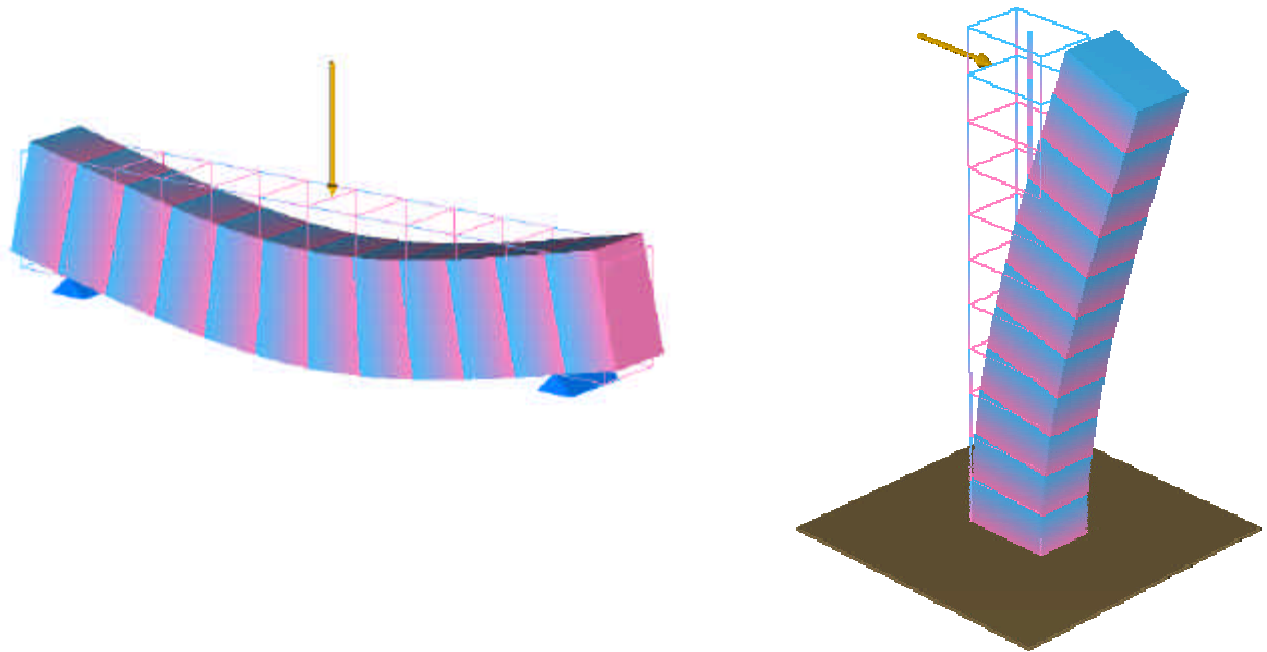


図1 単純梁（左図）と単柱（右図）の変形挙動

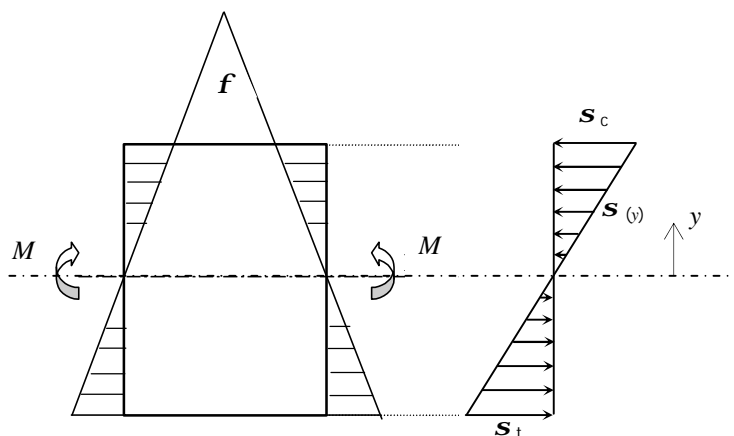


図2 曲げモーメントを受ける断面の曲率と応力分布

2. RC部材の非線形挙動

荷重の増大につれて、鉄筋コンクリート梁は、ひび割れ、鉄筋降伏、コンクリート圧縮破壊などの非線形挙動を呈し、その変形挙動は単純ではない。終局に至るまでの典型的な変形特性を、図3のように、主要点(A, B, C, D, Eの5段階)に分けて考えてみよう。

A 純弾性状態 (ひび割れ発生前): ひずみ分布/応力分布とも直線的に変化する純弾性状態。中立軸もほぼ中心に位置する。上式(1), (2)が成立する。

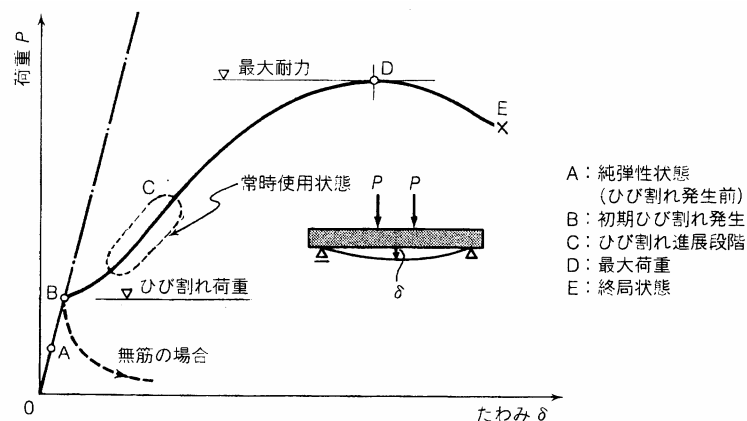
B 初期ひび割れ発生: 荷重を増大させると、コンクリート引張側の応力が引張強度を超え、ひび割れが生じ、これまでの線形弾性挙動から乖離し、曲率も増大する。

C ひび割れ進展段階: さらに荷重を増大させるとひび割れの本数と開口量も増加し、個々のひび割れは中立軸付近まで進行する。このためコンクリート引張域の抵抗力のほとんどが失われ、これに代わって引張鉄筋が引張力を受け持つことになる。

D 最大荷重近傍: さらに荷重を増やすと、圧縮コンクリートの塑性化が進行し、その分布が曲線形を呈するとともに、引張鉄筋にも大きな引張力が作用する。やがて両材料(引張鉄筋と圧縮コンクリート)の最大負荷能力に近づく。

E 終局状態: 過鉄筋ではない場合、引張鉄筋降伏後も中立軸の上昇によって荷重が若干増え、D点を通過し軟化状態になる。ここで大切なことは、その後も荷重を若干減らしつつ断面の追従能力が残存することで靱性が確保されていることである。耐震性の良否については、この段階の変形能力がポイントとなる。

また、図3右図には、A・C・D段階における断面のひずみ/応力分布を示した。このうち、ひずみ分布は、ある区間の平均をとると(平均ひずみで考えると)、終局時まで線形分布と仮定できる(平面保持がなお成立する)。一方、応力分布は、早期より引張側が喪失し、圧縮側が非線形分布(放物線状)となることわかる。



(a) 荷重とたわみの関係

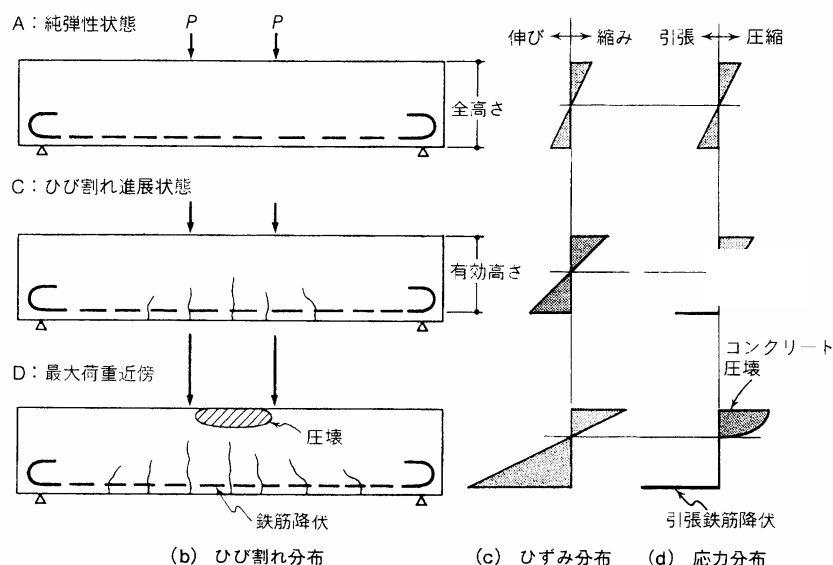


図3 鉄筋コンクリート梁部材の荷重とたわみの関係、ひび割れ分布、および中央断面のひずみ・応力分布

3. 数値シミュレーション#1: $M - f$ 関係

ここで、図4のような、引張鉄筋比 p をパラメーターとした数値シミュレーションにて、断面の非線形挙動を観察しよう。このため、ボックスに図示したような複鉄筋長方形断面(各一段配筋)を設定し、UC-win/Section を駆使して、数値計算を3例実施した。同図では、(a) $M - f$ 関係、(b) $M_u -$ 鉄筋比 p 関係、(c) 鉄筋比 $p - f_u$ 関係、(d) $f_u - M_u$ 関係、の4図を4象限にて示している。ここで、引張・圧縮鉄筋比は、 $p_1=0.5\%$ 、 $p_2=1.0\%$ 、 $p_3=1.5\%$ 、のように設定し、 $p_1 < p_2 < p_3$ となっていることに注意されたい。そのほかの諸条件については、図4ボックスに整理している。

図(a)では、 $M - f$ 関係を Tri-linear(3直線モデル)によって示している。また、引張鉄筋比 p の増大とともに、剛性、耐力ともに増加するが、主鉄筋降伏後の変形追随能力は減退することがわかる。また、鉄筋比の増加により、断面耐力 M_u は増加し(図(b))、断面靱性(曲率)について言えば、 f_y が若干増加し、 f_u が減少する(図(c)) (したがって、 $m = f_u / f_y$ にて定義される断面靱性率 m は減少することになる)。図(d)は、さらに鉄筋比を消去して、 M_u と f_u との関係を示したもので、鉄筋比の増加により、低強度高靱性から高強度低靱性率と推移していくことが直接判断できる。低鉄筋比の方が、高靱性で、エネルギー吸収能力において優れていると言える。

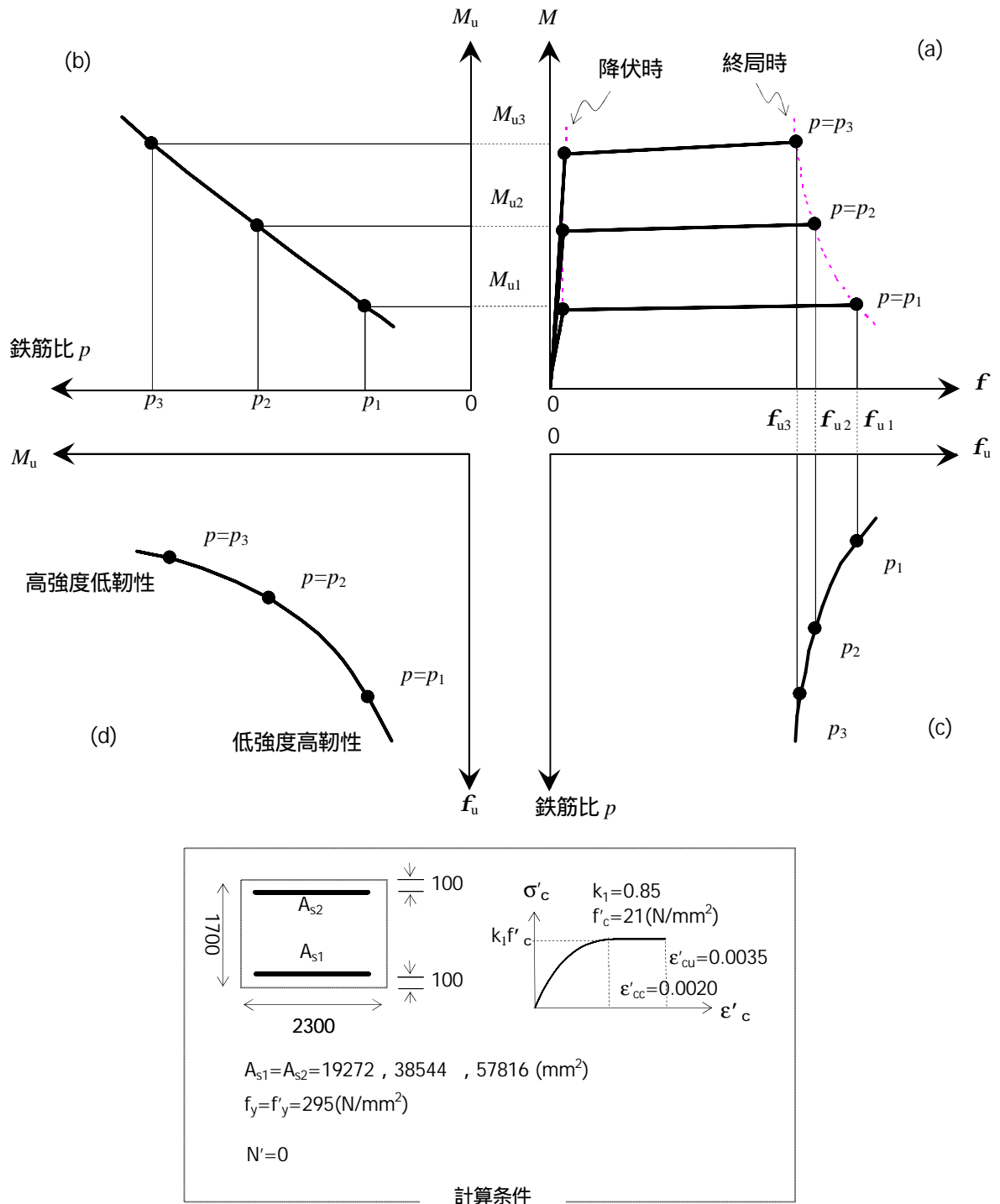
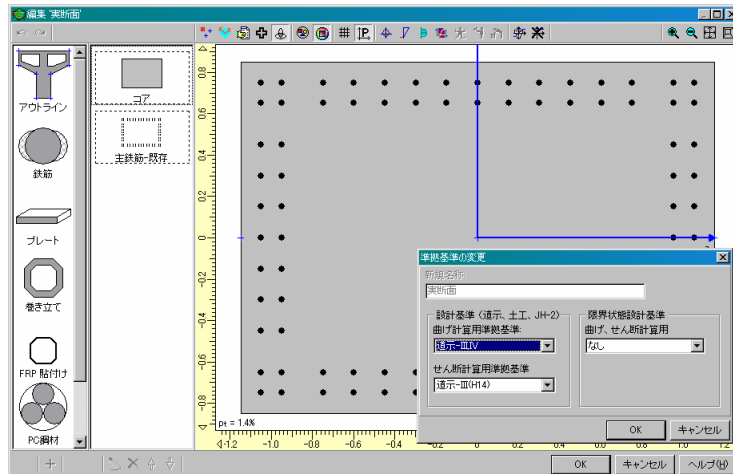
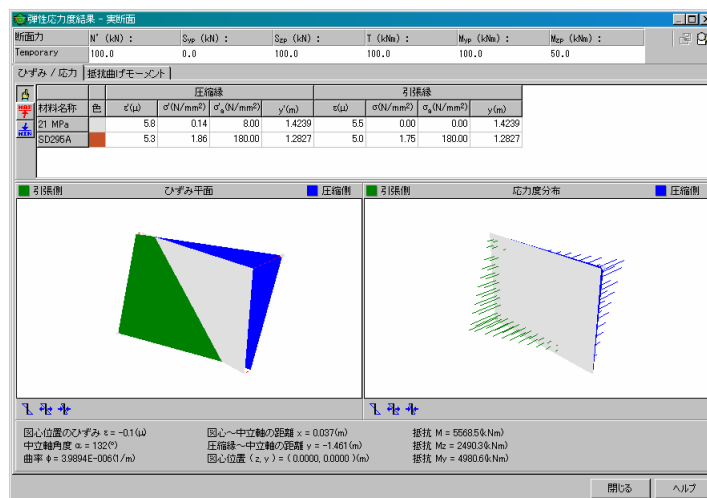


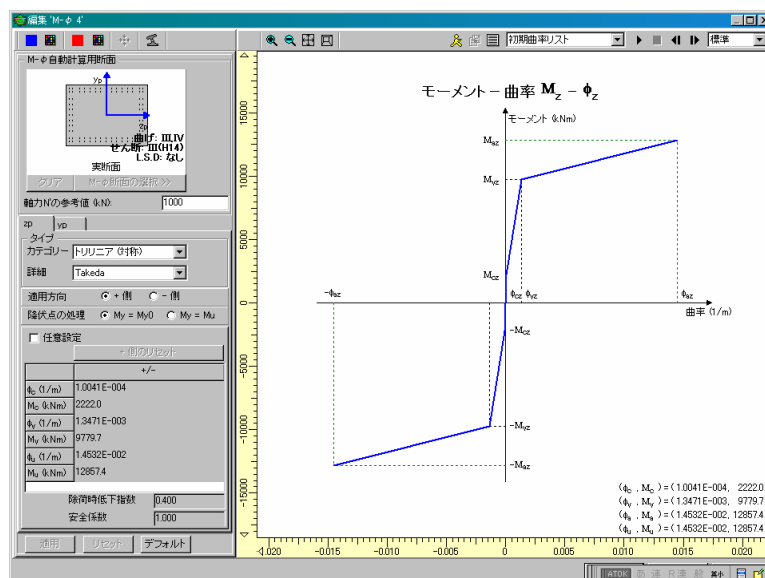
図4：鉄筋比をパラメータとした，
(a) $M - \delta$ 関係，(b) $M_u - p$ 関係，(c) $p - f_y \cdot f_u$ 関係，(d) $f_u - M_u$ 関係



(a)



(b)



(c)

UC-win/ Section による実行画面

(a)断面の作成と準拠基準の選択、(b)応力・ひずみ分布確認画面、(c) 水平軸回りの $M-f$ 曲線

4. 数値シミュレーション#2：断面靱性率

RC 部材の耐震設計に際しては，断面耐力に加えて断面の靱性率（終局曲率 f_u ）が重要となり，通例，降伏曲率 f_y で除した断面（曲率）靱性率 m_f にて考える．

$$\text{断面靱性率： } m_f = \frac{f_u}{f_y} \quad (3)$$

ここでは，前例の複鉄筋長方形断面を基本断面として，圧縮鉄筋量 A_{s2} / 引張鉄筋量 A_{s1} = 0, 0.25, 0.50, 0.75 の4例について，再度，UC-win/Section を用いて断面靱性率 m_f を算出した．

算定結果をとりまとめた図 5 から，まず，引張鉄筋量の増大に従って，断面靱性率は減少することがわかる．さらに，圧縮鉄筋量 A_{s2} の増大により断面靱性率は改善されるが，これは引張鉄筋量が多いほど，圧縮鉄筋の効果が著しい．断面靱性率 m_f は，このほかに，断面形状，コンクリート強度，鉄筋規格，に影響を受け，柱断面のように多段配筋の場合，側方鉄筋量にも影響される．

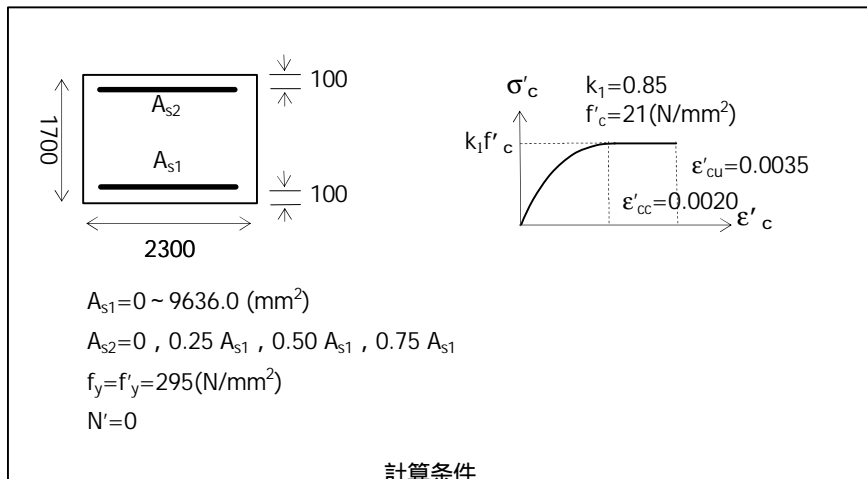
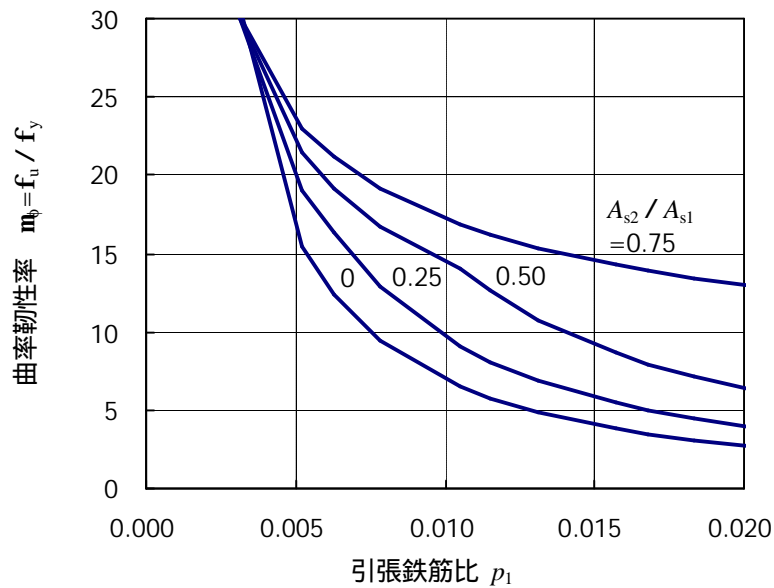


図 5：圧縮/引張鉄筋比をパラメーターとした，靱性率 m_f - 鉄筋比 p との関係

あとがき

WebLesson # 1 では、鉄筋コンクリートの非線形挙動の基本的な特徴を解説したもので、鉄筋コンクリート力学の入門編であり、耐震設計の基本事項である。ただし、ここでは、軸力が作用しない梁部材を取り扱うもので、柱部材を対象とした軸力が作用する場合については、次の # 2 にて紹介する予定である。また、柱部材、梁部材の変位を考える場合、曲率を長さ方向に 2 回積分して算出されるが、終局時については塑性ヒンジの概念を用いて簡略した解析法が多用される。

UC-win/Section とは.....

様々な断面形状、ならびに 2 軸曲げ作用状態が考慮できる、断面計算プログラム。鉄筋コンクリート断面だけでなく、複合断面、鋼断面、また、様々な補強断面に対し、応力度計算（曲げ、せん断）、耐力計算（曲げ、せん断）、 $M - f$ 計算（ M_c, M_{y0}, M_u ）が可能。道路橋示方書（日本道路協会）
、
編、コンクリート標準示方書に対応。開発および販売元は株式会社フォーラムエイト。