

論文 主筋の力学的性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ変形性能に及ぼす影響

寺井雅和^{*1}・南 宏一^{*2}

要旨：主筋として使われている鋼材の力学的性能を規定する諸数値が，鉄筋コンクリート部材の塑性ヒンジの形成における地震エネルギー消費に対してどのような関わりを持つのか，さらに，適正に塑性変形を制御するためには，鋼材の諸数値としてどのような値を与えればよいのかを解析的に検討した。解析の結果より，降伏後の剛性が大きい鋼材を利用したほうが，小さな塑性変形で大きな地震エネルギー消費を期待できることが確認された。

キーワード：鉄筋コンクリート，曲げ変形性能，終局曲げ耐力，塑性変形，断面解析

1. はじめに

筆者らは，地震による被害軽減を合理的に図る構造システムを創出するため，地震エネルギーを効果的に吸収，散逸させる耐震性新鋼材 15Ni-15Cr 鋼を開発し，それを組み込んだ塑性デバイスが従来の鋼材より地震エネルギーを効果的に吸収することを確認してきた。この鋼材を用いた耐震構造システムの開発は次のような段階を経ている。1)大きな地震動に対して構造物の被害を限定的なものにとどめ，構造物としての機能の回復が速やかに行えるように，低降伏点鋼と普通構造用鋼材の良さを具備する高性能鋼材の材料開発を行う。2)この新鋼材を鉄筋コンクリート構造や鋼構造の一部に組み込んだ塑性デバイスを構造システムに導入し，耐震技術の高度化を図る。

本研究では，この研究プロジェクトの一環として，鉄筋コンクリート(以下，RC)部材に内蔵した塑性デバイスがより効果的に地震エネルギーを吸収するよう，さらなる多種類の耐震性新鋼材の開発・検討を行っている。本論は，RC部材の主筋として使われている鋼材の力学的性能を規定する諸数値が，塑性ヒンジの形成における地震エネルギー消費に対してどのような関わりを持つのか，さらに，適正に塑性変形を制

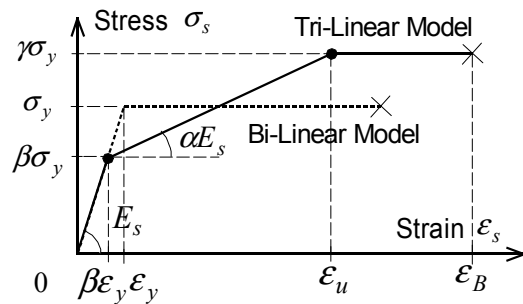


図 - 1 鋼材の $\sigma - \epsilon$ 関係における α, β, γ

御するためには，鋼材の諸数値としてどのような値を与えればよいのかを，主に主筋量と軸力比をパラメータして，簡単な断面解析法により検討したものである。

2. 鉄筋コンクリート部材の断面解析法

2.1 鋼材の $\sigma - \epsilon$ 関係における α, β, γ 効果

主筋として利用される鋼材の位置づけを定量化するために，鋼材の応力-ひずみ(以下， $\sigma - \epsilon$)関係において，様々な特性を持つ鋼材を想定して，本解析では α, β, γ の 3 つの係数で形状を変化させたトリリニアモデルを用い，この係数によって RC 部材の特性がどのように変化するのか解析的に検討する。鉄筋降伏後のヤング係数に α ，鉄筋の降伏応力度に β と γ を係数とした場合，鉄筋の強度はそれぞれ，降伏前では

*1 福山大学 工学部建築学科講師 博(工) (正会員)

*2 福山大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

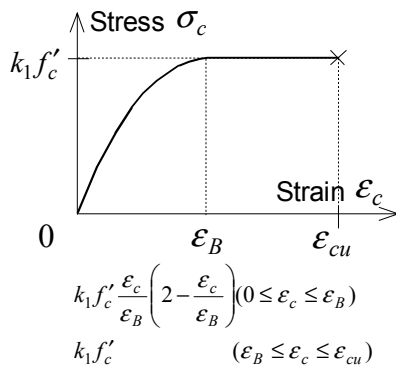


図 - 2 コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係

式(1), 降伏後では式(2), そして最大強度は式(3)で表わすことができる(図 - 1)。

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (0 \leq \epsilon_s \leq \beta \epsilon_y) \quad (1)$$

$$\sigma_s = \alpha E_s \epsilon_s + \beta \sigma_y (1 - \alpha) \quad (\beta \epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_u) \quad (2)$$

$$\sigma_s = \gamma \sigma_y \quad (\epsilon_u \leq \epsilon_s) \quad (3)$$

ここに, $E_s, \epsilon_s, \sigma_y$ はそれぞれ鉄筋のヤング係数, 鉄筋のひずみ, 鉄筋の降伏応力度である。

2.2 RC はり部材の解析

RC 部材の単調載荷時の曲げ変形性能に及ぼす主筋の α, β, γ 諸数値の影響を検討するため, α, β, γ を主変数とする 27 組のパラメトリック解析を行う(表 - 1)。解析は, 鉄筋およびコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係を図 - 1, 2 の通り仮定し, 図 - 3 のような RC 部材断面に対して平面保持の仮定のもとで曲げモーメント - 曲率(以下, $M - \phi$)関係を計算する。計算は簡単のために, 単調載荷の場合を検討する。中立軸を求める非線形求解法には, ニュートン・ラプソン法を利用して収束計算を行った。なお, ここで想定している RC 部材の断面は, 過去に筆者らの研究室で行われた実験^{1), 2)}に対応させるた

表 - 1 解析因子

鋼材 係数	α	0.05	0.1	0.3			
	β	0.6	0.8	1.0			
	γ	1.2	1.4	1.6			
軸力比		0.0	0.1	0.3	0.6		
配筋		シングル配筋		ダブル配筋			
引張 補強筋	pt(%)	0.33	0.48	0.85	1.30	1.99	5.30

表 - 2 材料特性

コンクリート		鉄筋	
σ_B	30.0N/mm ²	σ_y	400N/mm ²
ϵ_B	0.0020	ϵ_y	0.0020
ϵ_{cu}	0.0035	ϵ_u	γ による
		ϵ_B	0.3500

め, 断面寸法は 150mm × 200mm である。また, 材料諸元は表 - 2 に示す値で固定して計算した。

表 - 1 に解析因子を示すように, 単筋と複筋の場合で検討するが, 複筋の部材では, 正負交番載荷を行った柱部材の実験との比較ができるよう, 上端筋と下端筋は同じ主筋量とした。また, 曲げを受ける部材の破壊は, 引張鉄筋量と密接な関係があるため, 引張鉄筋量についてもパラメータとして検討した。鉄筋量により部材の破壊パターンが変化するが, その境界値となるのが最小鉄筋比 p_{min} と最大鉄筋比 p_{max} である。最小鉄筋比は, 日本建築学会の RC 計算規準では 0.4%, 土木学会標準示方書では 0.2% と定められている。最大鉄筋比は, 土木の示方書では釣合い鉄筋比 p_b の 75% 以下の引張側鉄筋比となるように定められている。本解析で対象としている部材断面(150mm × 200mm)と, 表 - 2 に示す材料を用いた場合, 釣合い鉄筋比 p_b は約 3.3% となるので, 今回の解析では最大鉄筋比 p_{max} を 2.4% とする(ただし, 実際の p_b 値は β や γ によって変動する)。表 - 1 にお

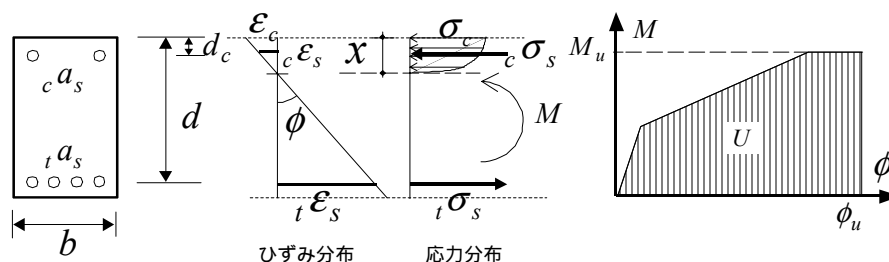


図 - 3 部材性能を規定する変数

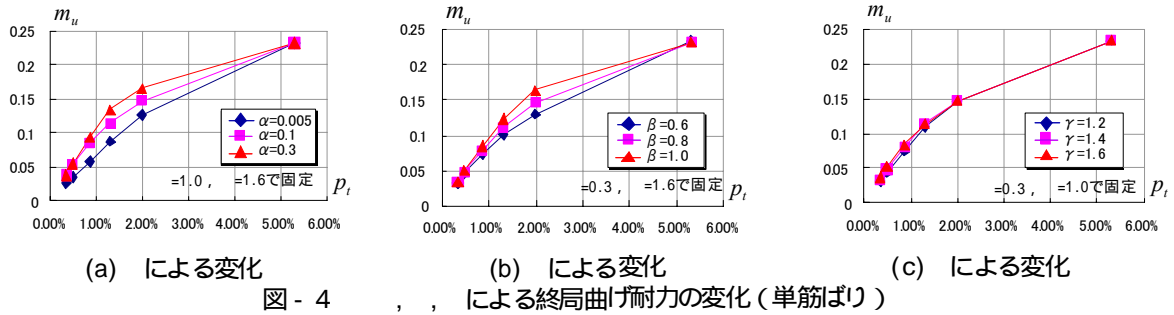


図 - 4

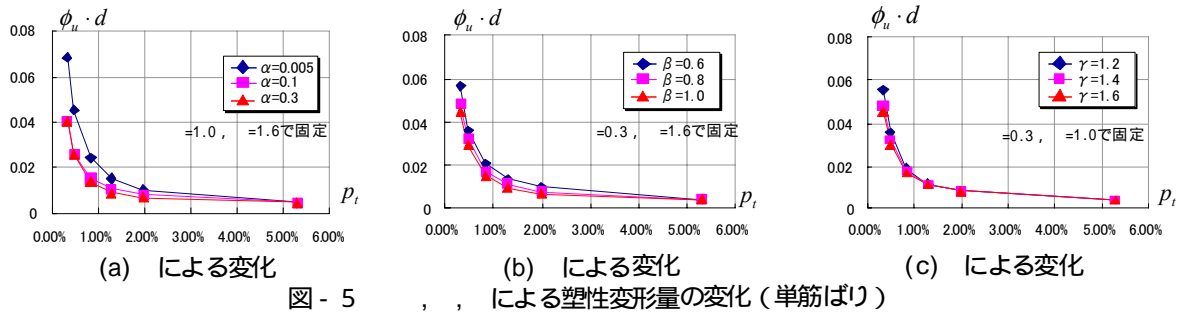


図 - 5

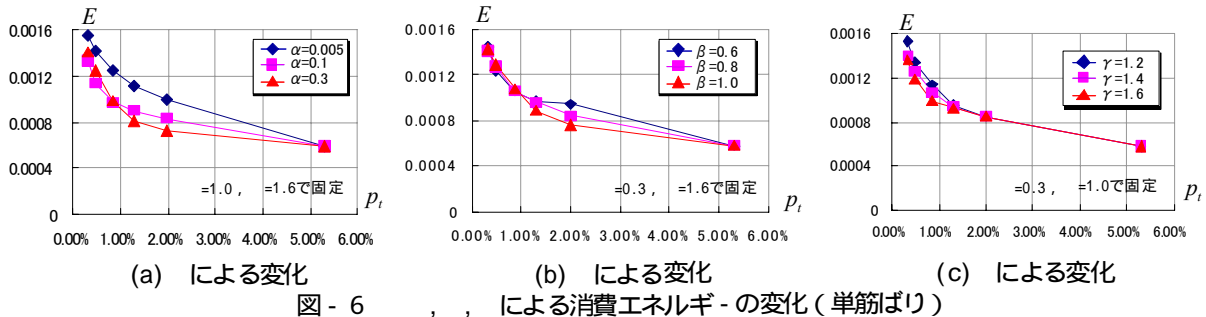


図 - 6

ける p_t のうち、0.48% ~ 1.99%までが実際の設計でも用いられる範囲の鉄筋量となり、0.33%は無筋部材に等しい貧補強を、5.3%は釣合い鉄筋比を過剰に超えた補強をした部材を想定したものとして設定した。

3. 計算結果

3.1 部材性能評価

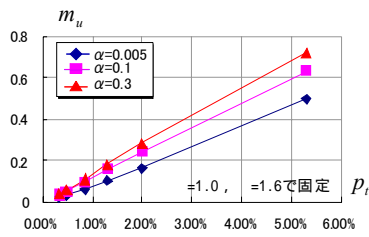
計算結果から、部材性能を評価する 3 変量を抽出する。3 変量とは、図 - 3 に示す、終局曲げ耐力 M_u 、終局塑性変形量 ϕ_u 、および $M-\phi$ 関係で囲まれる面積より求めた部材の消費エネルギー量 U である。図 - 4 ~ 9 は、この 3 変量の無次元量 $m_u (=M_u/bd^2\sigma_B)$ 、 $\phi_u \cdot d$ および $E (=U/bd\sigma_B)$ を縦軸にとり、横軸は引張主筋量 p_t としている。各データは図中に示す係数で固定したときの値をプロットしている。

(1) 単筋ばり

単筋ばりの計算結果を整理した図 - 4 ~ 6 によると、 p_t が大きいほど m_u は大きく、 $\phi_u \cdot d$ と E は小さくなる傾向がみられる。 α が大きいほど m_u と E は大きく、 $\phi_u \cdot d$ は小さくなるため、RC 部材の性能はよくなることがわかる。 β についても α と同じ傾向がある。 γ については値による違いがほとんど見られなかったが、これは単筋ばりの場合、コンクリートの圧縮破壊で耐力が決まり、引張主筋が γ により規定される最大強度に到達する前に、コンクリートが破壊するためである。

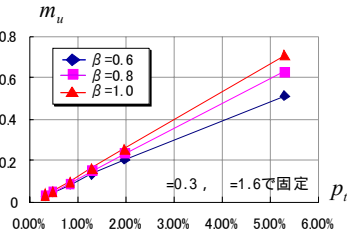
(2) 複筋ばり

図 - 7 ~ 9 は複筋比 ($c a_s / t a_s$) = 1.0 の複筋ばりの計算結果を整理したものである。定量的には、圧縮側に主筋があることにより、単筋ばりに比べて曲げ耐力と消費エネルギーは大きくなるが、変形能力は小さく脆性的になる。引張主

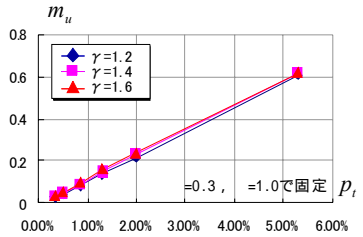


(a) による変化

図 - 7

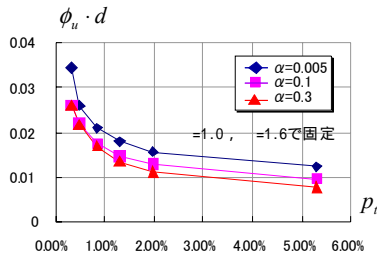


(b) による変化



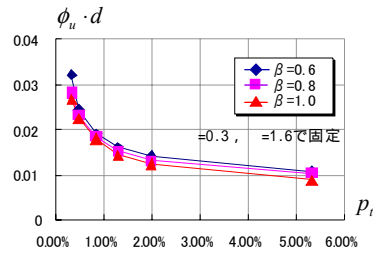
(c) による変化

, , による終局曲げ耐力の変化 (複筋ばり)

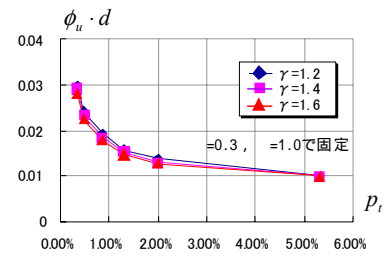


(a) による変化

図 - 8

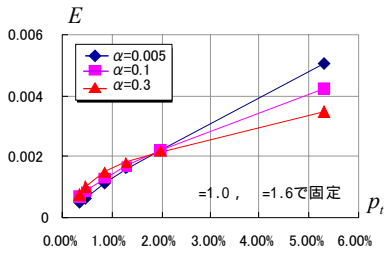


(b) による変化



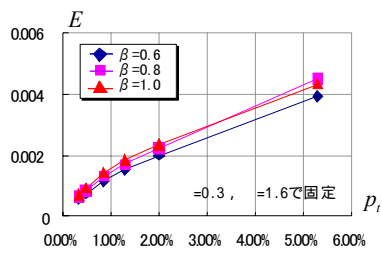
(c) による変化

, , による塑性変形量の変化 (複筋ばり)

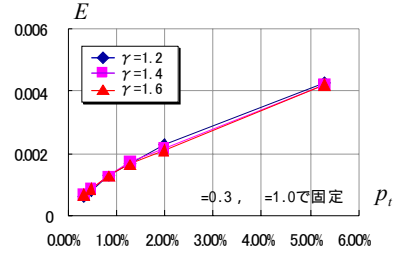


(a) による変化

図 - 9



(b) による変化



(c) による変化

, , による消費エネルギー - の変化 (複筋ばり)

筋量に対する傾向は、 m_u と $\phi_u \cdot d$ は単筋ばりと同じ傾向を示しているが、 E は引張主筋量が大きくなるほど、エネルギー吸収は大きくなり、単筋ばりとは逆になっている。 α, β, γ がそれぞれの部材性能変量に及ぼす影響も、単筋ばりの場合とほとんど変わらない。 α と β は大きい方が、曲げ耐力は大きくなり、塑性変形は小さく抑えることができる。ここで、 α が大きくなると、主筋の σ - ε 関係はバイリニア型に近づいていくが、このことは α が 0.05 (限りなく第 2 剛性がゼロ) のケースに等しいことになる。したがって、どの程度 α が大きければ最も部材性能を発揮できるかについては、今後引き続き検討することとする。

以上より、次のことが確認できる。

- ・ 終局曲げ耐力を大きくし、塑性変形量を小さく抑えるためには α と β は大きい方がよい。
- ・ 一般的な配筋では、 α と β は大きい方がエネルギー消費量は大きくなる。

3.2 α, β, γ が部材性能に及ぼす影響

パラメータが多いため、膨大な計算結果から最も部材性能に適した α, β, γ の組み合わせを見つけることは煩雑となり困難である。ここでは、統計的手法を用い、部材性能の指標となる終局曲げ耐力 m 、最大変形 $\phi_u \cdot d$ 、エネルギー消費量 E 、に及ぼす α, β, γ の依存度を計算した。

統計処理の方法として、重回帰分析^{例えば 3)}を行う。 α, β, γ の複数の変量 (説明変量) から、部材の構造性能を表す $m, \phi_u \cdot d, E$ (目的変量) を、一次式で予測するのが重回帰分析である。このような統計処理を行うと式 (4) ~ (6) のような一次式が作られ、目標変量の予測や制御をすることができる。

$$m = a_1\alpha + a_2\beta + a_3\gamma + a_4 \quad (4)$$

$$\phi_u \cdot d = b_1\alpha + b_2\beta + b_3\gamma + b_4 \quad (5)$$

$$E = c_1\alpha + c_2\beta + c_3\gamma + c_4 \quad (6)$$

ここで、 $a_{1\sim 3}, b_{1\sim 3}, c_{1\sim 3}$ は回帰係数と呼ばれ、

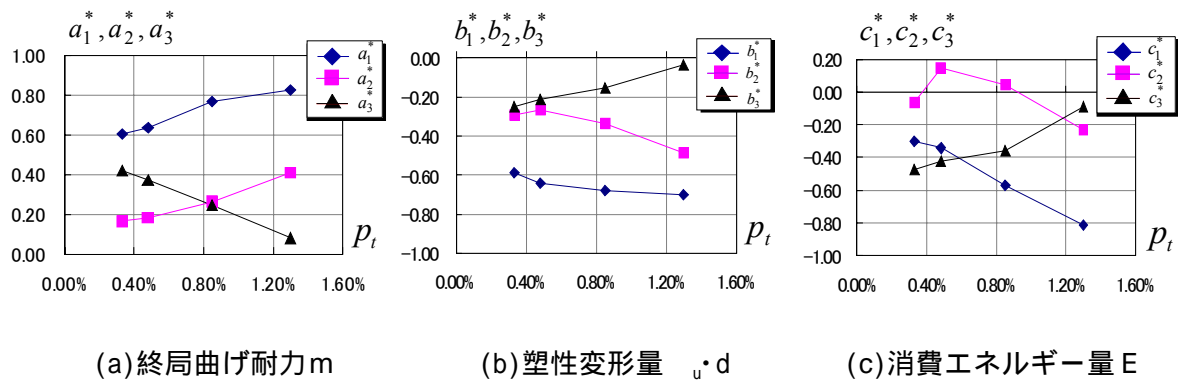


図 - 10 α, β, γ 値の標準回帰係数と補強筋比の関係 (単筋ばりの場合)

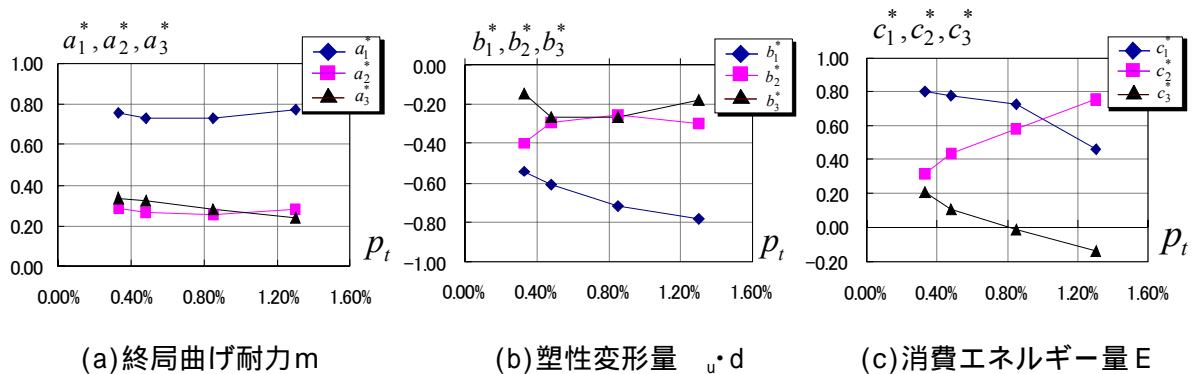


図 - 11 α, β, γ 値の標準回帰係数と補強筋比の関係 (複筋ばりの場合)

この値が高いほど各説明変量の目的変量への寄与が高いことを表している。

説明変量 α, β, γ は互いに変動幅が異なるため、このままの回帰係数から、説明変量の影響の大きさを単純に比較・評価することはできない。そこで、説明変量の大きさに左右されないために、“データの標準化”処理を行い、回帰係数を 0.0~1.0 の範囲で表わすことにする。この係数を標準回帰係数と呼び、ここでは回帰係数にアスタリスク*をつけた $a_{1-3}^*, b_{1-3}^*, c_{1-3}^*$ で表す。横軸に引張主筋量 p_t を、縦軸に標準回帰係数をとったグラフを図 - 10, 11 に示す。この図において、標準回帰係数の絶対値が 1 に近いほうが、説明変量への依存度が大きいことを表している。符号に正負があるが、係数が負の場合、説明変量に対する影響が反対の性質を示すことを表しており、例えば図 - 10(b)の場合、 α 値の標準回帰係数 b_1^* に着目すると、この値が大きいほうが塑性変形量を小さくすることになる。なお、 p_t が 1.99% と 5.3% のときは、 α, β, γ にかかわらず説明変量の値が決まるので、

統計処理は行わなかった。

単筋、複筋にかかわらず、全ての目的変量において a_1^*, b_1^*, c_1^* の係数値は高く、 p_t にかかわらず α の依存は高いことがわかる。すなわち、 α が大きいほうが曲げ耐力は高く、塑性変形を小さく抑えると言いうことができるが、これは 3.1 で確認したことと同じである。単筋ばりにおいて、 γ は引張主筋量 p_t が大きくなるにしたがって目的変量への依存度小さくなる傾向があるが、これも 3.1 で述べたように、主筋が γ 値で決まる第 3 勾配へ入る前に、圧縮側コンクリートが破壊してしまうためである。

エネルギー消費量 E については、単筋ばりと複筋ばりで傾向が異なっている。単筋ばりの場合、主筋降伏後の剛性が小さい方が大きな変形を許容し、結果として α が大きい場合より消費エネルギーは大きくなる。そのため、図 - 10(c)では、回帰係数は負に現れている。一方、複筋ばりにすると塑性変形が抑えられるので、エネルギー消費の観点からすると、主筋降伏後の剛性が大きい方が消費エネルギー量は大きく

なる。しかし、 p_t が大きく、断面内に鉄筋量が多くなると、その影響(依存度)は下がってることが図 - 11(c)からわかる。

3.3 軸力の影響

柱断面に対する軸力比

$n (= N/bD\sigma_B)$ を 0.0, 0.1, 0.3, 0.6 と変化させた計算結果を、図 - 12 に示す。ここでの計算はこれまでの解析と同様、断面寸法は 150mm × 200mm とし、配筋は断面内に D13 4 本配筋(片側 2 本ずつ)したものを想定している。また、パラメータが多く煩雑になるので、 α は 0.3 で固定し、 β, γ を表 - 1 の通り変化させた 9 通りの結果を一つの図にまとめて描いた。

軸力がない場合(図 - 12(a))、RC 部材の $M-\phi$ 関係は、鋼材のトリリニア型の復元力特性がそのまま現れている。軸力が大きくなるにつれて、鉄筋が降伏する前にコンクリートの圧縮ひずみで破壊が決まってくるので、 α, β, γ 値による変化の影響がほとんどなくなってくるのがわかる。

4. まとめ

主筋として使われている鋼材の力学的性能を規定する諸数値が、RC 部材の塑性ヒンジの形成における地震エネルギー消費に対してどのような関わりを持つのか、さらに適正に塑性変形を制御するためには、鋼材の諸数値としてどのような値を与えればよいのかを、 α, β, γ についてパラメトリックな解析を行い、さらに α, β, γ のもつ意味を調べるために重回帰分析を行った。

配筋量と軸力比に絞って解析結果を整理・検討した結果、以下のことが確認できた。

- ・終局曲げ耐力を大きくし、塑性変形量を小さく抑えるためには α と β は大きい方がよい。
- ・一般的な配筋では、 α と β は大きい方がエネルギー消費量は大きくなる。
- ・このたび計算に用いた材料の範囲では、 γ に

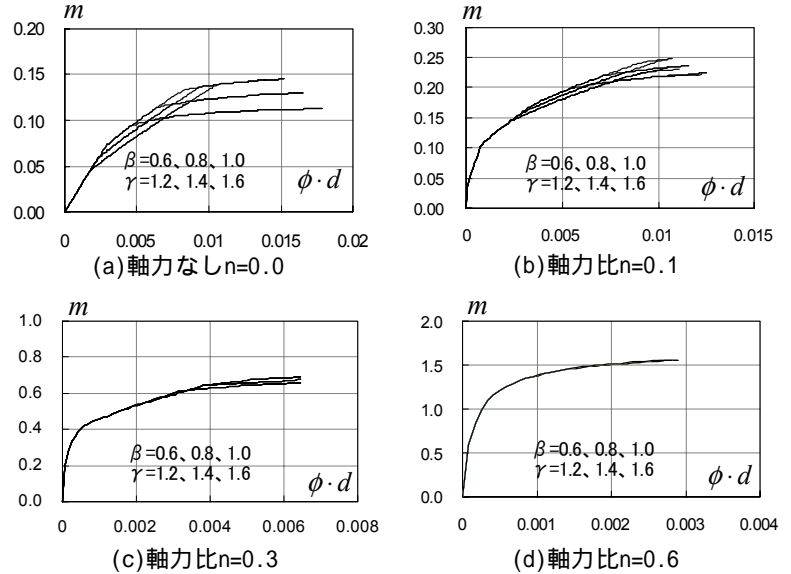


図 - 12 軸力比を変数とした計算結果 ($\alpha=0.3$ で固定)

よる部材性能の大きな違いはみられなかった。
・軸力が大きくなると、 α, β, γ 値による変化の影響がほとんどなくなる。

以上のまとめから、柱材の主筋に α, β, γ を意識した特殊な鋼材を用いても、部材性能には顕著な効果が現れないので、柱材には普通鋼材を用い、塑性化するはり材に降伏後の剛性が高い鋼材を用いることで、ヒンジ部分で変形を抑え、かつエネルギー消費能力に優れているという観点で、効果的であると言える。

謝辞 本研究は、平成 11~15 年度私立大学学術研究高度化推進事業(ハイテク・リサーチ・センター事業)の援助のもとで行われた。

参考文献

- 1) 寺井雅和, 南 宏一: 鉄筋コンクリート部材の曲げ変形性能に及ぼす主筋の力学的性状の影響, 第一回性能規定型耐震設計に関する研究発表会講演論文集, pp.149-154, 2004.5
- 2) 寺井雅和, 南 宏一: ステンレス鋼(SUS304)を主筋に用いた RC 部材の曲げ変形性能に関する一実験, 建築学会 2004 年度大会(北海道)学術講演公害集 C-1, pp.233-234, 2004.9
- 3) 涌井良行, 涌井貞美: 図解でわかる 多変量解析, 日本実業出版社, 2001