

論文

[2105] 高強度材料を用いた RC 柱断面の終局時 $M-N-\phi$ 関係

黒田洋子*1・小宮敏明*2・畑中重光*3

1 はじめに

曲げと軸力を受ける柱断面の終局時の耐力および変形能力は、一般に、曲げモーメント (M)-軸力 (N)-曲率 (ϕ) 関係図によって表される¹⁾。最近の鉄筋コンクリート (RC) 構造の分野では、高強度コンクリート、高強度鉄筋の使用など、新材料の適用の気運が高まっている。本研究の目的は、RC 柱の $M-N-\phi$ 曲線に及ぼす構成材料、とりわけ高強度材料の力学特性の影響を把握することにある。本報では、まず 1) 通常行われる $M-N-\phi$ 曲線の解析方法についての比較・検討を行い、次に 2) コンクリートおよび鉄筋の材料特性をパラメータとする事例解析に基づき、材料の高強度化が $M-N-\phi$ 関係に及ぼす影響について若干の考察を行う。

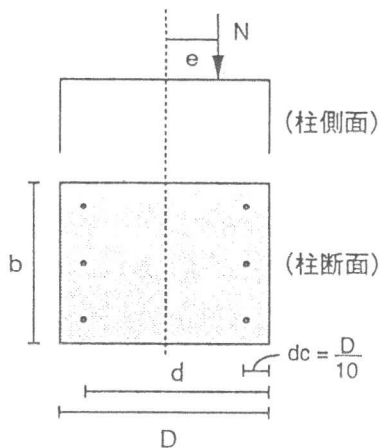


図-1 RC 柱断面

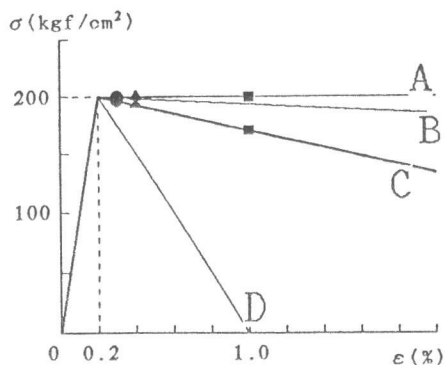
2 解析方法と終局の定義について

2.1 解析方法

(1) 解析仮定

RC 柱断面の終局状態として、(3) 項に示

表-1 解析パラメータ

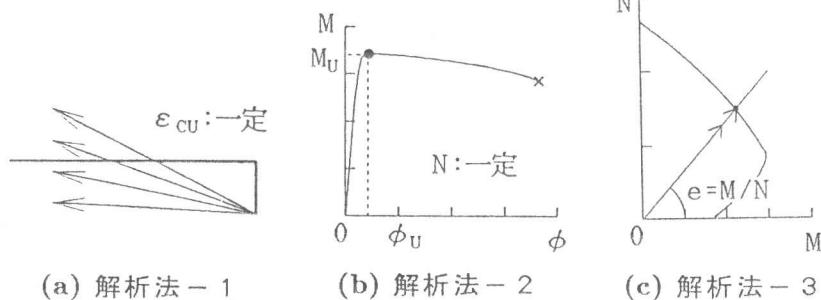


σ-ε 曲線		終局ひずみ ε _{cu} ^{*2}	鉄筋の諸値
記号	ε ₀ ^{*1}		
A	∞	0.3%	E _s =2.1×10 ⁶ kgf/cm ² p _t =p _c =1% σ _{sy} =3500 kgf/cm ²
B	25%	0.4%	
C	6%	1.0%	
D	1%		

*1 ε₀ : σ=0 となる ε の値
*2 ε_{cu} : 曲線 A および C のみ設定

図-2 コンクリートの σ-ε 曲線

表-2 解析方法



終局ひずみ	定数	変数
解析法-1	○	
解析法-2	○	○
解析法-3	○	○

図-3 各解析法の概要

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)
*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻
*3 三重大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

す3種類の場合を考える。解析においては平面保持を仮定し、コンクリートの引張応力は無視する。
 (2) 解析断面とパラメータ

対象とするRC柱断面の概要を図-1に、解析パラメータを表-1に示す。コンクリートの圧縮応力(σ)-ひずみ(ϵ)関係には、図-2に示す4種類を用いる。鉄筋の応力-ひずみ関係は、座屈、ひずみ硬化のない *bi-linear*型とする。

(3) 解析の概要

以下に示す3種類の解析方法による計算プログラムを作成した。その概要を、表-2および図-3(a)~(c)に示す。

- 1) 解析法-1: 圧縮縁コンクリートの終局ひずみ (ϵ_{cu}) を一定値とし、任意の中立軸位置に対して内部応力分布を求め、曲げモーメント (M) と軸力 (N) の組み合わせを得る。本研究では、図-2の σ - ϵ 曲線 A、C に対し、 $\epsilon_{cu} = 0.3$ (●)、 0.4 (▲)、および 1% (■) と設定した。
- 2) 解析法-2: 軸力 (N) を設定し、曲げモーメント (M) が最大となる場合を求める。
- 3) 解析法-3: 図-3(c)に示すように、ある偏心距離 (e) を設定し、軸力 (N) が最大となる値を求める。

2.2 解析結果と考察

解析法-1で求めた $M-N-\phi$ 曲線を図-4(a) および (b) に示す。図中の◎印は引張鉄筋の降伏と同時に圧

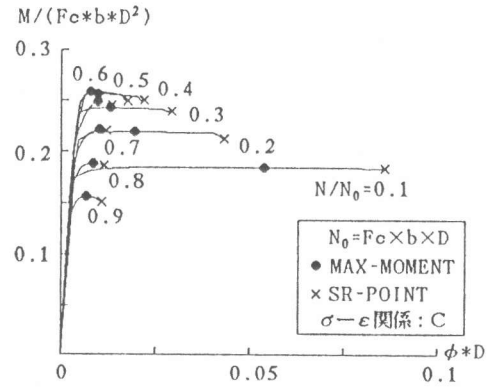
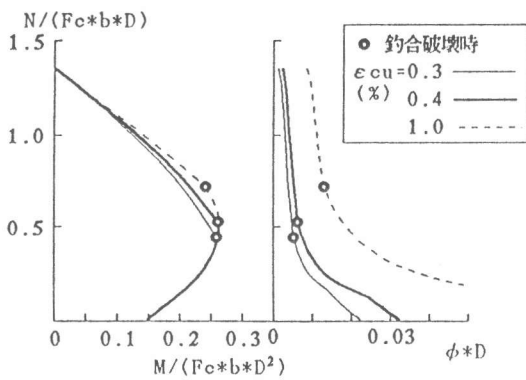


図-5 解析法-2による $M-\phi$ 曲線 (N :設定)



(a) Aタイプの $\sigma-\epsilon$ 曲線

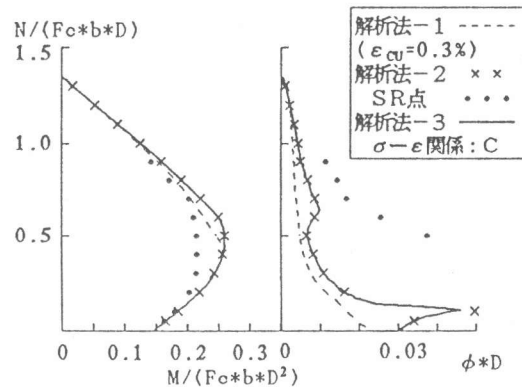
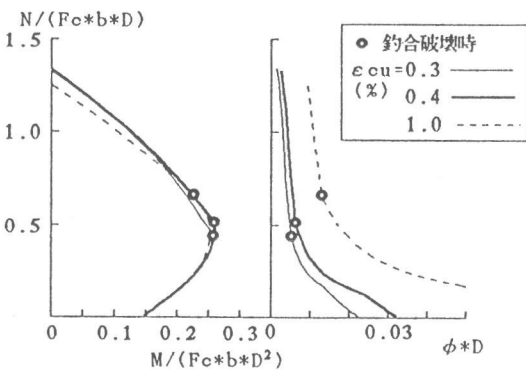


図-6 解析法-1, 2, 3による $M-N-\phi$ 曲線の比較



(b) Cタイプの $\sigma-\epsilon$ 曲線

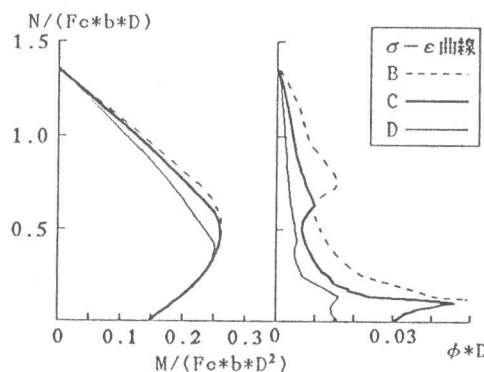


図-7 解析法-3による $M-N-\phi$ 曲線に及ぼすコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線の影響 (e :設定)

図-4 解析法-1による $M-N-\phi$ 曲線 (ϵ_{cu} :一定)

縮縁コンクリートが終局ひずみに達する時点、すなわち釣合破壊時である。この図から、 $M - N$ 曲線上で M が最大となる点と釣合破壊時とは必ずしも一致しないことが分かる。

解析法-2 で求めた $M - \phi$ 曲線の一例を図-5 に示す。計算は、断面の曲率が単調増加するにもかかわらず、鉄筋のひずみが戻り始める点（図中の×印、SR点^{2),3)} まで行った。この点以後、曲げモーメントの低下が著しくなることが知られている。

図-6 は、解析法-1、2、および3 で求めた $M - N - \phi$ 曲線を比較したものである。解析法-2 (×印) および3 (実線) による結果を比較すると、両者の値はほぼ一致している。また、解析法-2 および3 による $N - \phi$ 曲線の形状は、 $\epsilon_{cu} = 0.3\%$ と設定した解析法-1 による曲線（破線）とはかなり異なっており、軸力の増加にともない、曲率が必ずしも単調減少していない。これは、解析法-2 および3 では、終局状態を最大曲げモーメント時と定義しているためである。この点に関する詳しい検討は第4節で行う。

図-7 は、コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係を図-2 の B、C および D とした場合の $M - N - \phi$ 曲線の計算値である。ちなみに、解析法-2 および3 では、コンクリートの終局ひずみが任意であるため、釣合破壊点は求められない。

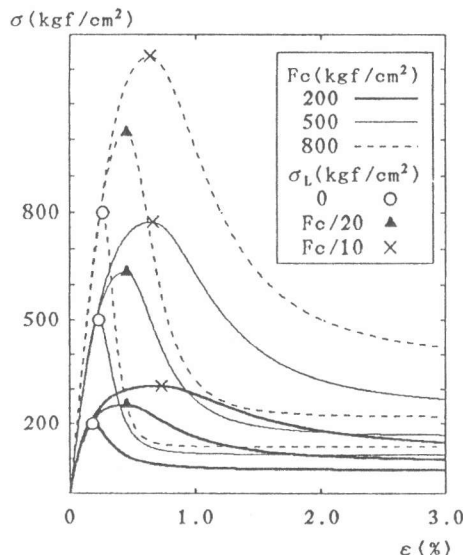


図-8 コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線

3 材料特性の影響

3.1 解析方法

軸力比ごとの数値データの比較を容易にするため、本節の解析方法は、前節で述べた解析法-2 (軸力設定) とした。解析パラメータを表-3 に示す。コンクリートの圧縮 $\sigma - \epsilon$ 曲線には図-8 のような筆者らの提案式⁴⁾ による計算値を用いる。

3.2 解析結果と考察

$M - N - \phi$ 曲線の解析結果を図-9 ~ 11 に示す。なおこれらの図において、b) 図は最大モーメント時、c) 図は SR 点における $N - \phi$ 曲線を表している。

(1) 鉄筋強度の影響 (図-9)

鉄筋強度が大きくなると耐力のみならず靱性も増す。ここで、低軸力域における耐力の増大は引張鉄筋、高軸力域における耐力および靱性の増大は圧縮鉄筋の効果によるものと考えられる。

(2) 拘束圧の影響

(図-10)

拘束圧 (σ_L) が大きい場合、圧縮破壊域で耐力が増大している。また、全域にわたって靱性が大幅に増大する。

表-3 解析パラメータ

コンクリート (kgf/cm ²)		鉄筋強度	軸力比 N/(Fc·b·D)
Fc *1	σ_L *2	Fy (kgf/cm ²)	
200	0	3500	0.25
500	Fc/20	7000	0.50
800	Fc/10	10500	0.75

*1 Fc : 圧縮強度

*2 σ_L : 拘束圧

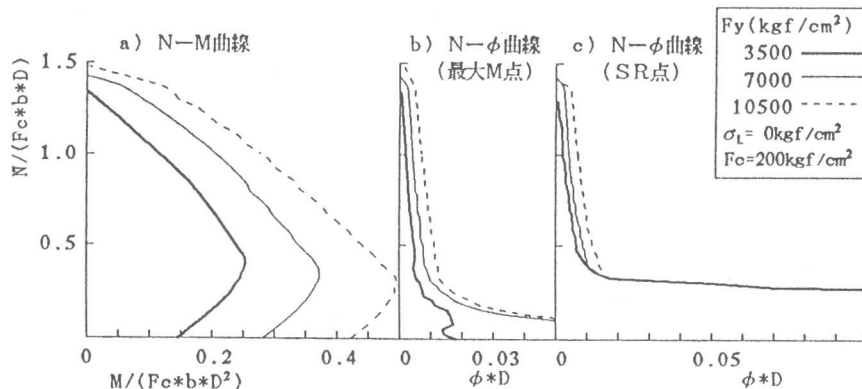


図-9 鉄筋強度 (F_y) の影響 (N :設定)

(3) コンクリート強度の影響

(図-11)

(a) 図によれば、コンクリート強度の増加にともなって、 $N-M$ 曲線、 $N-\phi$ 曲線も拡大する。一方、コンクリート強度で軸力および曲げモーメントを除した (b) 図によれば、 $N-M$ 曲線は縮小する。すなわち、終局時の N 、 M 、 ϕ の値はコンクリート強度とともに増減するが、比例関係ではない。

3.3 各種要因の影響

各種要因が柱の曲げ耐力、および終局曲率（最大曲げモーメント時）に及ぼす影響を、軸力比が0.5の場合について図-12に示した。(a) 図によれば、曲げ耐力は鉄筋強度 (F_y)、およびコンクリート強度 (F_c) の増加にともなって増大する。また拘束圧 (σ_L) による曲げ耐力の増加量は、鉄筋強度およびコンクリート強度が高いほど大きい。さらに図-10からも分かるように、このような拘束圧の効果は、軸力比が高いほど大きくなる。(b) 図によれば靱性（ここでは終局曲率）は、特にコンクリート強度が低い場合 (200kgf/cm^2 の時) に、拘束圧によって大きく影響を受けることが分かる。この傾向は、図-10からも分かるように、軸力比が小さい場合にさらに顕著になる。

4 コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線の影響

図-6、7と図-9～11を比較すると、 $N-\phi$ 曲線の形状が明らかに異なる。ただ、図-5からも分かるように、最大曲げモーメントの近傍では、曲率に多少の変動があっても曲げモーメントの値はあまり変化しない。ここでは、敢えて $N-\phi$ 曲線の形状の変化という点に注目し、その原因を調べるため、以下の解析を行った。

4.1 解析方法

ここでは、コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線として図-2および図-8を参考に、図-13のような軟化域の最大負勾配のほぼ等しい曲線 a、直線 b (図-2のC) を用いた。また、図中には前節で使用した

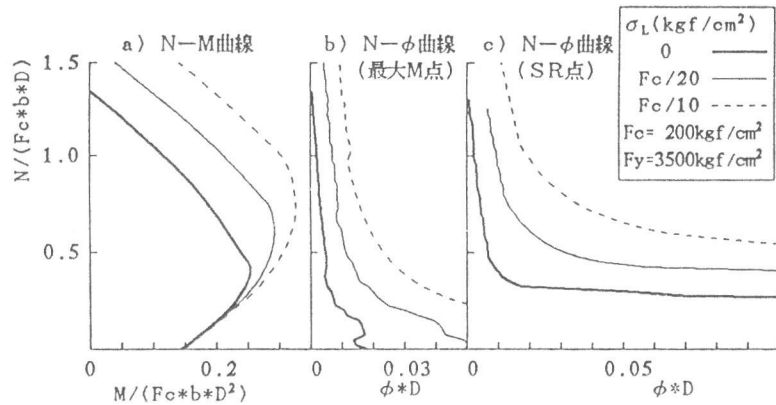
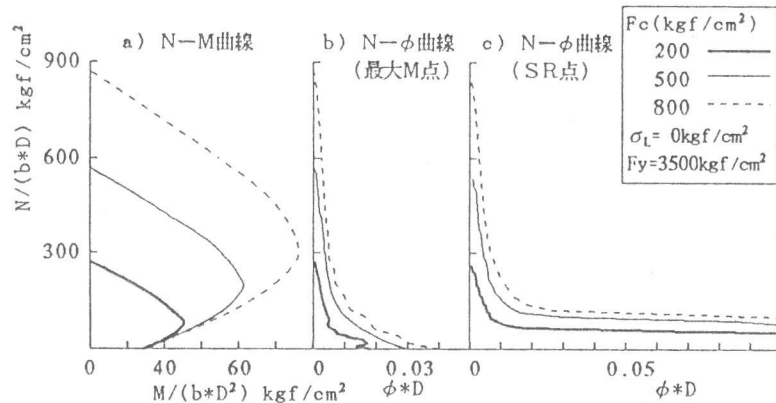
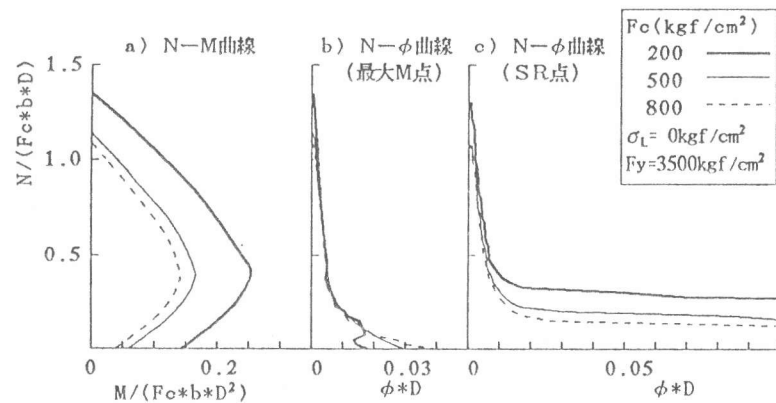


図-10 拘束圧 (σ_L) の影響 (N :設定)



(a) $N/(b \cdot D) - M/(b \cdot D^2) - \phi D$ 曲線



(b) $N/(F_c \cdot b \cdot D) - M/(F_c \cdot b \cdot D^2) - \phi D$ 曲線

図-11 コンクリート強度 (F_c) の影響 (N :設定)

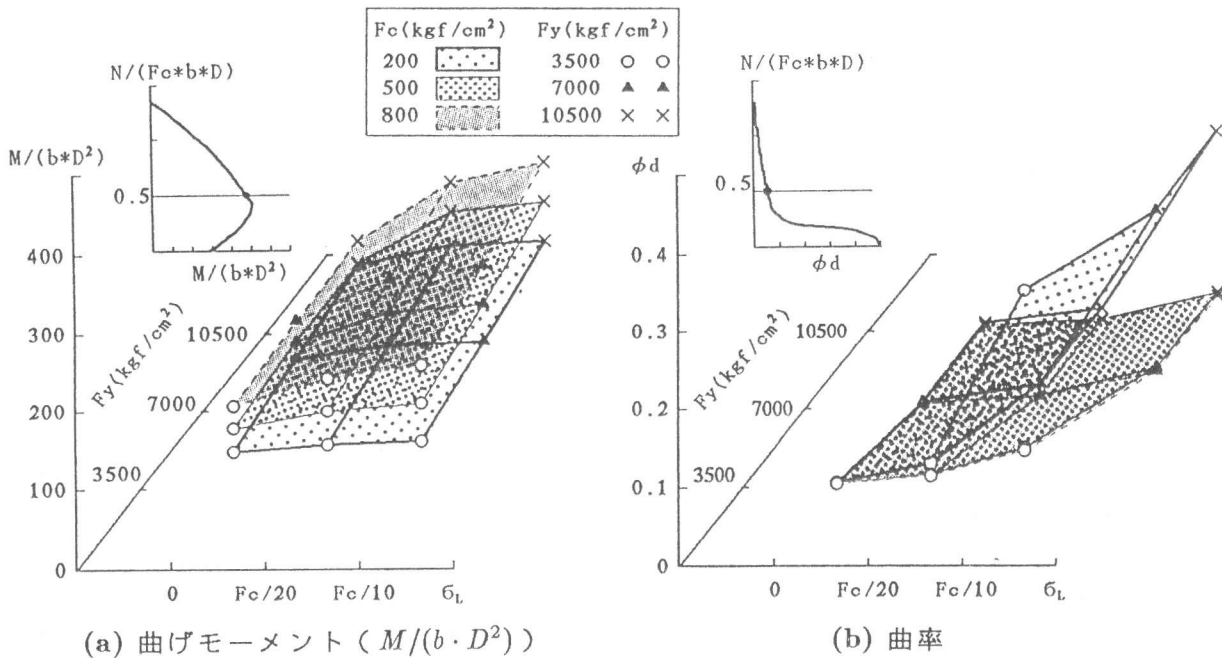


図-12 軸力比 0.5 の場合における各種要因の影響

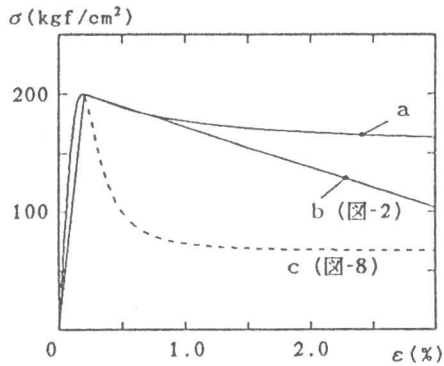


図-13 コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線

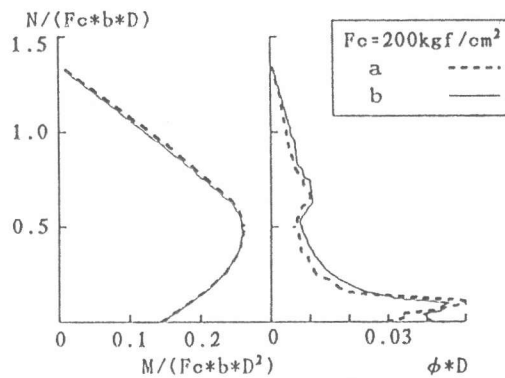


図-14 コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線の影響 (N :設定)

図-8 中の曲線 ($F_c = 200 \text{ kgf/cm}^2, \sigma_L = 0 \text{ kgf/cm}^2$) も曲線 c として併示してある。なお解析方法は、前節で述べた解析法-2 (軸力設定) とした。

4.2 解析結果と考察

解析結果を図-14 に示す。図によれば、応力下降域を直線とした曲線 b に対する $N - \phi$ 曲線も単調減少していない。図-13 に併示した曲線 c を用いた場合には、図-9 ~ 11 で見られたように $N - \phi$ 曲線に顕著な凸凹は生じない。これらのことから、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の下降域の傾きが緩い場合には、ひずみも変化しても応力はあまり変動しないため、 $N - \phi$ 曲線の凸凹が生じるものと考えられる。前掲の図-7 によれば、下降域の傾きが緩いと、 $N - \phi$ 曲線の凸凹がやはり大きくなっている。

また、図-13 の曲線 b を用いた解析で、構成素材のひずみデータを分析したものが図-15 である。図によれば、軸力比が 0.6 付近における曲率のピーク点 (状態 3) では引張鉄筋が、0.1 付近では、圧縮鉄筋が降伏している。また、コンクリートの終局ひずみは 0.2 ~ 0.8% までの広い範囲で変化している。つまりその範囲での下降域の傾きが $N - \phi$ 曲線の形状を左右していることになる。

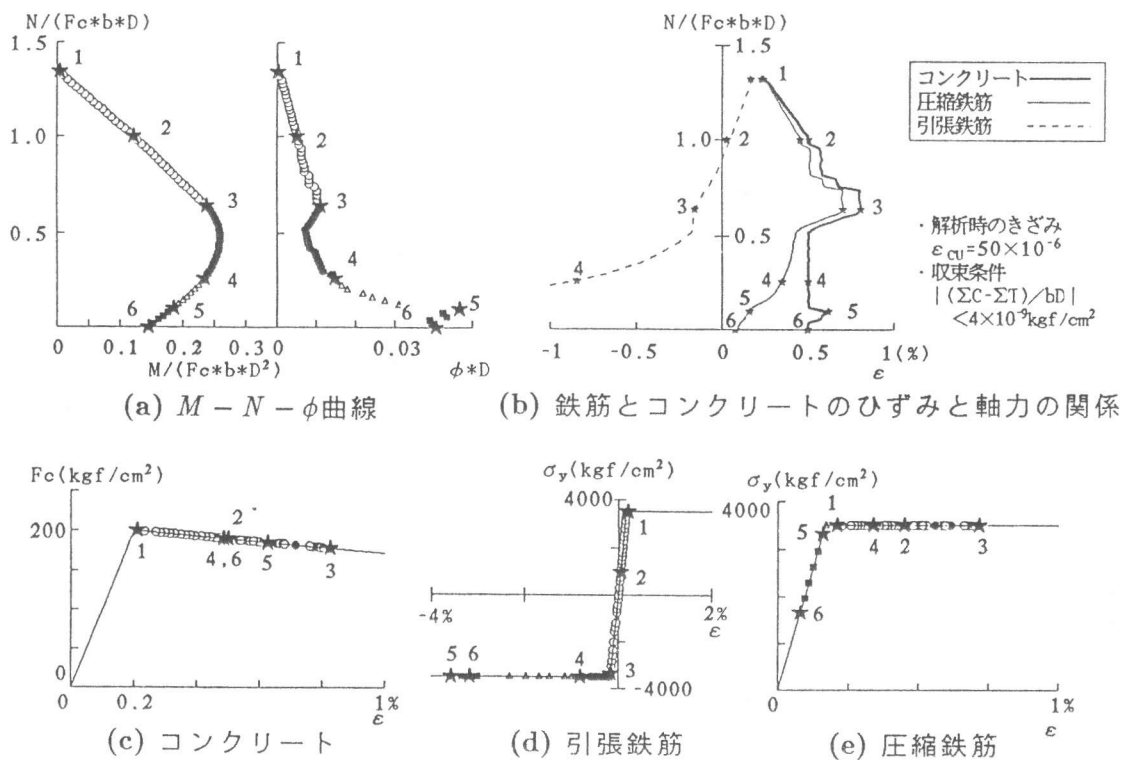


図-15 構成素材のひずみ (N:設定)

5 まとめ

- (1) 終局ひずみが定数の場合、 $M - N$ 曲線で M が最大となる点が釣合破壊時とは必ずしもならない (図-4)。
- (2) 終局状態の算定法として、解析法-2 (軸力設定) を用いても、解析法-3 (偏心距離設定) を用いてもほぼ同一の結果が得られる (図-6)。
- (3) RC 柱断面の曲げ耐力はコンクリート強度および鉄筋強度に、また靱性 (回転能) はコンクリートの横拘束圧によって大きく異なる。本報では、その程度を軸力比 0.5 の場合について定量的に示した (図-12)。
- (4) RC 柱断面の曲げ耐力に及ぼす横補強筋による拘束圧の効果は、軸鉄筋およびコンクリートに高強度材料を用いるほど顕著に、すなわち重要になる。また、この傾向は、軸力比が高いほど明確に現れる。(図-9 ~ 12)
- (5) コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線の下降域の傾きが、緩やかな場合は最大曲げモーメント時の $N - \phi$ 曲線に凸凹が生じ易くなる。(図-7,14)

[引用文献]

- 1) 小阪・森田, 「鉄筋コンクリート構造」第5章, 丸善, 昭50.
- 2) 鈴木・中塚・藤岡, 「PRC 曲げ部材断面の終局域特性について」, セメント技術年報, 第32巻, pp.36-439, 昭53.
- 3) 小柳・六郷・岩瀬, 「RC はりの曲げ破壊過程と曲げじん性に及ぼす材料特性の影響」, 土木学会論文集, 第348号, V-1, pp.153-162, 昭59.8.
- 4) 谷川・畑中・柴田・服部, 「高強度コンクリートの圧縮靱性改善に関する基礎的研究」, 建築学会大会梗概集, pp.513-514, 平成元.

[謝辞] 本研究に際し、貴重な御助言を賜った大阪大学工学部・中塚倍先生に深謝致します。なお本研究費の一部は、平成3・4年度、日本住宅総合センター調査研究助成金によったことを付記する。