

エンドクロニック理論による 鉄筋コンクリート部材の地震応答解析

山 田 和 夫

Analyses for Earthquake Responses of Reinforced Concrete Members by Endochronic Theory

Kazuo YAMADA

In this paper, the applicability of a new inelastic analytical procedure of reinforced concrete based on endochronic theory is discussed. The behaviors on inelastic response of reinforced concrete members subjected to earthquake ground motions are investigated. Main results are summarized as follows :

- 1) The stress-strain relations predicted with the endochronic theory proposed by Z. P. Bazant et al. are applicable to the predictions of the dynamic response of reinforced concrete members.
- 2) The responses of reinforced concrete member subjected to earthquake ground motions are very affected by the slippage between longitudinal steel bar and concrete.
- 3) The coupling effects of two-dimensional external forces for the dynamic response of reinforced concrete member are clearly noticed, in the region that the reinforced concrete member is unstable.

1. はじめに

筆者^{1)~5)}は、従来からコンクリートの応力度一ひずみ度関係に対するエンドクロニック理論の適用性について一連の検討を行ってきたが、本研究では繰返し荷重、特に不規則外乱を受けるコンクリートの応力度一ひずみ度関係に対するエンドクロニック理論の適用性を検討するために、筆者が先に提案した横補強筋およびせん断力によるコンクリートの多軸応力効果、主筋とコンクリート間のすべりならびに部材端の主筋の抜け出し効果などの情報を反映できる非弾性解析手法³⁾を適用して、鉄筋コンクリート柱に関する地震応答解析を行った。

2. 解析方法

多自由度システムが地震動を受ける場合を考えると、運動方程式は一般的に次のように表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -\{f(t)\} \dots \dots (1)$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリクス、 $[C]$ ：減衰マトリクス、 $[K]$ ：瞬間剛性マトリクス、 $\{f(t)\} (= [M]\{1\}\ddot{y}_0)$ ：地震動による慣性力ベクトル、 $\{\ddot{u}\}$ ：加速度ベクトル、 $\{\dot{u}\}$ ：速度ベクトル、 $\{u\}$ ：変位ベクトル、 \ddot{y}_0 ：地震動加速度。

増分解法を用いて材料非線形問題を考えると、式(1)は次のように変換される。

$$\begin{aligned}
[M]\{\ddot{u}\}_{i+1} + [C]\{\dot{u}\}_{i+1} + \{\Delta P\}_{i,i+1} + \{P\}_i \\
= -\{f(t)\}_{i+1} \\
\{\Delta P\}_{i,i+1} = [K]\{\Delta u\}_{i,i+1} - \{\Delta P'\}_{i,i+1} \\
\{u\}_{i+1} = \{u\}_i + \{\Delta u\}_{i,i+1} \dots \dots \dots (2)
\end{aligned}$$

ここに、 $[K]$ ：接線瞬間剛性マトリクス、 $\{P\}_i$ ： i ステップにおける静的節点力ベクトル、 $\{\Delta P\}_{i,i+1}$ および $\{\Delta u\}_{i,i+1}$ ：それぞれ i ステップから $(i+1)$ ステップに至るまでに生じる増分節点力および増分節点変位ベクトル、 $\{\Delta P'\}$ ：増分等価非弾性力ベクトル（引張クラックの発生によって生じる解放力ベク

トル, 次章で述べるエンドクロニック理論に関連して生じる等価非弾性力ベクトル, 前ステップで生じた誤差力ベクトルなどを含む), また添字 "i" および "i + 1" は, それぞれ i ステップおよび (i + 1) ステップの値であることを示す。

本解析では, Newmark の β 法を用いて式(2)の運動方程式を解いた。ただし, $\beta=1/4$ とした。

ところで, 鉄筋コンクリート部材の両材端(材端-1 および材端-2) の力増分および変位増分ベクトルを, それぞれ $\{\Delta P_1\}$, $\{\Delta P_2\}$, $\{\Delta u_1\}$ および $\{\Delta u_2\}$ と置くと, 式(2)中の増分節点力ベクトル $\{\Delta P\}$ は, 次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} P_1' \\ P_2' \end{Bmatrix} \quad (3)$$

または,

$$\{\Delta P\} = [K]\{\Delta u\} - \{\Delta P'\} \quad (3')$$

ここに, $[K]$: 部材の接線瞬間剛性マトリクス, $\{\Delta u\}$: 増分節点変位ベクトル, $\{\Delta P'\}$: 増分等価非弾性力ベクトル。

本解析では, 式(3)または式(3')で表される増分節点力ベクトルを前掲の式(2)の運動方程式に代入することによって, 地震応答解析を行った。なお, 部材の接線瞬間剛性マトリクスおよび増分等価非弾性力ベクトルの算定には, 筆者が先に提案した断面分割法³⁾を用いた。

また, 鉄筋コンクリート部材の減衰マトリクス $[C]$ としては, 次式を用いた。

$$[C] = \varepsilon_1 [M] + \varepsilon_2 [K] \quad (4)$$

ここに, ε_1 および ε_2 : 比例定数。ただし, 本解析では $\varepsilon_1=0.0$ および $\varepsilon_2=0.05$ とした。

3. エンドクロニック理論の概要

鉄筋コンクリート部材内のコンクリートは, 横方向拘束筋などによる拘束を受けて多軸応力場にあるため, 本解析では, 応力度-ひずみ度(以下, $\sigma-\varepsilon$ と略記する)関係の表示に Z. P. Bazant らが提案した3種類のエンドクロニック理論⁹⁾⁻¹¹⁾を適用した。

エンドクロニック理論では, コンクリートの累積損傷のモデル化に際して, これまでに提案されている他の構成モデルとは全く異なった手法を用いている。Z. P. Bazant らが導入した新しい概念は, 固有時間 (Intrinsic time) と呼ばれるひずみ増分に依存する非減少のスカラー変数を用いて, 累積損傷に伴

って生じる非弾性ひずみを表すことにある。また, この理論の最大の特徴は, 破壊条件をとくに設定することなく, 多軸応力場のコンクリートに対し汎用性のある $\sigma-\varepsilon$ 関係を得ることができることにある。

3種類のエンドクロニック理論は, いずれも次式に示すように $\sigma-\varepsilon$ 関係を増分形式で取り扱っている。この増分 $\sigma-\varepsilon$ 関係を偏差成分と体積成分とに分割し, さらに各増分ひずみ度をそれぞれ弾性成分と非弾性成分の和として表している。

$$\begin{aligned} \Delta e_{ij} &= \Delta S_{ij} / (2G) + \Delta e''_{ij} \\ \Delta \varepsilon &= \Delta \sigma / (3K) + \Delta \varepsilon'' \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに, $\Delta e_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \cdot \Delta \varepsilon$: 増分ひずみテンソル $\Delta \underline{\varepsilon}$ の偏差成分, $\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{kk} / 3$: 増分体積ひずみ度, $\Delta \varepsilon_{ij}$: 増分ひずみテンソル $\Delta \underline{\varepsilon}$ の $i j$ 成分, δ_{ij} : クロネッカーのデルタ, $\Delta S_{ij} = \Delta \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \Delta \sigma$: 応力テンソル $\Delta \underline{\sigma}$ の偏差成分, $\Delta \sigma = \Delta \sigma_{kk} / 3$: 増分体積応力度, $\Delta \sigma_{ij}$: 増分応力テンソル $\Delta \underline{\sigma}$ の $i j$ 成分, G : 接線せん断弾性係数, K : 接線体積弾性係数, $\Delta e''_{ij}$: 増分非弾性偏差ひずみ度, $\Delta \varepsilon''$: 増分非弾性体積ひずみ度。

上式で表される $\sigma-\varepsilon$ 関係をマトリクス形式で表示すると次のようになる。

$$\{\Delta \sigma_{ij} + \Delta \sigma''_{ij}\} = [D_c] \cdot \{\Delta \varepsilon_{kl}\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, $\Delta \sigma''_{ij} = 2G \cdot \Delta e''_{ij} + 3K \cdot \Delta \varepsilon'' \cdot \delta_{ij}$: 非弾性応力テンソル $\Delta \underline{\sigma}''$ の $i j$ 成分, $[D_c]$: コンクリートの増分 $\sigma-\varepsilon$ マトリクス。

ただし, エンドクロニック理論では, 引張破壊後の $\sigma-\varepsilon$ 関係を定義していないため, 本研究では, コンクリート要素における最大主応力度(引張を正, 圧縮を負とする)がコンクリートの引張強度 (f_t) を超えた場合には, その主応力方向の剛性を零とし, かつ主応力方向に垂直な方向のせん断剛性を β 倍 (ただし, $0 \leq \beta \leq 1$) し, $\sigma-\varepsilon$ マトリクスを直交異方向性に変換 ($[D'_c]$ するとともに, その方向の増分非弾性応力度 ($\Delta \sigma''_{ij}$) を零にすることによって, 引張破壊後の $\sigma-\varepsilon$ 関係を表示することとした。すなわち, 増分 $\sigma-\varepsilon$ 関係を次のように変換する。

$$\{\Delta \sigma_{ij} + \Delta \sigma''_{ij}\} = [D'_c] \cdot \{\Delta \varepsilon_{kl}\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

主応力方向は, 一般に基準座標軸と異なるため, 上記の引張クラック発生後の $\sigma-\varepsilon$ マトリクス ($[D'_c]$) および増分非弾性応力度 ($\{\Delta \sigma''_{ij}\}$) を基準座標系のそれ ($[{}_g D'_c]$ および $\{\Delta {}_g \sigma''_{ij}\}$) に変換する必要がある。いま, 応力変換マトリクス (ひず

み度がテンソル量であるため、ひずみ変換マトリクスと応力変換マトリクスは一致する)を[R]とすると、基準座標系に関する $\sigma-\epsilon$ マトリクスおよび増分非弾性応力度は、それぞれ

$$[{}_g D'_c] = [R]^{-1} \cdot [D'_c] \cdot [R] \dots\dots\dots(8)$$

$$\{\Delta_g \sigma''_{ij}\} = [R]^{-1} \cdot \{\Delta \sigma''_{ij}\} \dots\dots\dots(9)$$

なる関係を用いて決定できる。

また、この時その最大主応力度の解放を行う。解放すべき主応力を $\{\sigma_{ij}\}$ とすると、基準座標系に関する解放応力 $(\{\sigma'_{ij}\})$ は、上記の応力変換マトリクス([R])を用いて次のように表される。

$$\{\sigma'_{ij}\} = [R]^{-1} \cdot \{\sigma_{ij}\} \dots\dots\dots(10)$$

この応力度を、エンドクロニック理論式中の増分非弾性応力度 $(\{\Delta \sigma''_{ij}\})$ に加えることによって、最大主応力度の解放を行う。なお、後述するクラック面に垂直な方向の等価クラックひずみ度が負になった場合には、引張クラックは閉鎖したものとみなし、コンクリートの $\sigma-\epsilon$ マトリクスを式(6)にもどす。

ただし、エンドクロニック理論に限らずコンクリートの構成モデルの多くは連続体力学に基づいているため、上記の引張クラックの幾何学的不連続性に起因する等価クラックひずみ度を分離する方が合理的である。そのため、本解析では、引張クラックを有するコンクリート要素の全ひずみ度 $(\{\epsilon_{ij}\})$ 、平面保持の仮定から定まる値)を、式(11)のように上記の等価クラックひずみ度 $(\{\epsilon_{crij}\})$ と連続体部のひずみ度 $(\{\epsilon_{cij}\})$ との和で表すこととした。

$$\{\epsilon_{ij}\} = \{\epsilon_{crij}\} + \{\epsilon_{cij}\} \dots\dots\dots(11)$$

これらのうち、連続体部のひずみ度は、コンクリート要素内で応力度が一定であるものと仮定すれば、連続体部のコンクリートの $\sigma-\epsilon$ マトリクス $[D_c]$ 、等方性マトリクス)を用いて決定できる。

また、引張クラックが発生した場合には、応力度の解放に関連して、ひずみ度の再分配を行う。ただし、この場合その時点のひずみ度は保持するものとみなす。すなわち、応力度の解放に伴う等価クラックひずみ度と連続体部のひずみ度の変化の和は零とする。

$$\{\Delta \epsilon_{crij}\} + \{\Delta \epsilon_{cij}\} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

いま、解放応力度を $\{\sigma_{ij}\}$ とすると、 $\{\Delta \epsilon_{cij}\}$ は次のようになる。

$$\{\Delta \epsilon_{cij}\} = [D_c]^{-1} \cdot \{\sigma_{ij}\} \dots\dots\dots(13)$$

したがって、コンクリート要素の接線弾性係数(KおよびG)ならびに各種非弾性ひずみ度(または応

表-1 解析要因

コンクリートの構成モデル	付着剛性 (tf/cm ³)	入力地震波成分
Type-I	∞	NS成分
Type-II	10.0	EW成分
Type-III	0.0	両成分

[註]主筋とコンクリート間の付着特性は弾性。

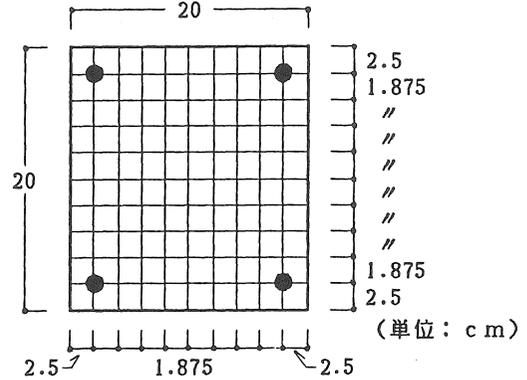


図-1 鉄筋コンクリート柱断面の分割

力度)は、上記の手法によって算定される連続体部のひずみ度および応力度を用いて決定することができる。

4. 解析モデル

本解析では、鉄筋コンクリート部材の地震応答特性に及ぼすコンクリートの構成モデル、主筋とコンクリート間の付着剛性および地震波入力成分の影響について検討を行った。適用したコンクリートの構成モデルは、前述したように、Z. P. Bazantらが提案した1976年の初期エンドクロニック理論⁶⁾(Type-I)、1978年の修正エンドクロニック理論⁷⁾(Type-II)および1980年の繰返し載荷時の特性を修正したエンドクロニック理論⁸⁾(Type-III)の3種類とした。なお、主筋の構成モデルは、ひずみ硬化とパウシグー効果を考慮した非線形モデル^{9),10)}を使用し、帯筋の構成モデルは完全弾塑性型のバイリニアタイプを用いた。また、主筋とコンクリート間の付着-すべり関係は、線形と仮定した。解析の概要を表-1に示す。

本解析で取り上げた解析モデルは、寸法が20×20×60cm、横補強筋間隔が15.0cmの鉄筋コンクリート柱で軸力が16.0tf加わった場合を解析の対象とし、図-1に示すように断面を分割して解析を行っ

表一 構成素材の力学特性

(a) コンクリート

初期ヤング係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	初期 ポアソン比	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
1.98	0.18	222	22.2

(b) 鉄筋

種類 (径)	初期ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	降伏点 (kgf/cm ²)	ひずみ硬化開始 時のひずみ度	引張強度 (kgf/cm ²)	引張強度時 のひずみ度
主筋 (D-13)	1.96	3937	0.02	5600	0.2
帯筋 (ϕ -9)	1.96	3937	-	-	-

た。構成素材の各種力学特性を表一 2 に示す。入力地震波は、ElCentro 1940年地震のNS成分およびEW成分を使用し、部材の固有周期を0.3secと設定した。なお、地震波の入力レベルは、NS方向の最大加速度が鉄筋コンクリート柱の降伏震度の1.55倍となるように設定した。

5. 解析結果とその考察

5. 1 コンクリートの構成モデルの影響

前述のように、本解析ではコンクリートの構成モデルとしてZ. P. Bazantらが提案した3種類のエンドクロニック理論を用いている。エンドクロニック理論は、いずれも取扱いが他の構成モデルと比較して若干面倒ではあるが、破壊条件をとくに設定しなくとも最大耐力以降の力学挙動の解明が可能であるというすぐれた特徴を有している。

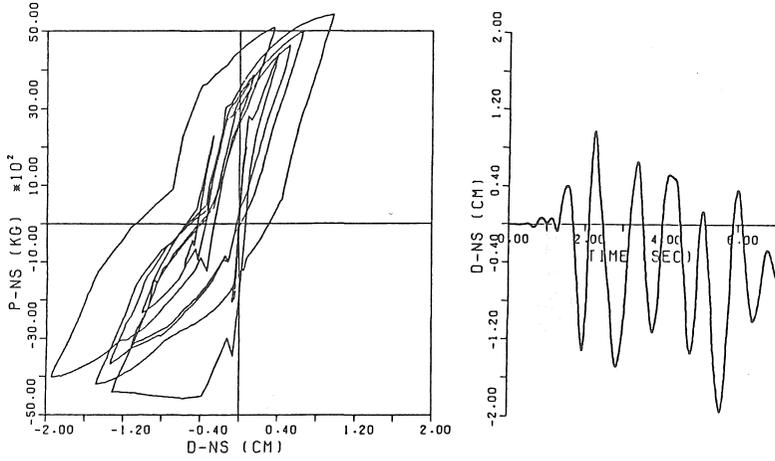
図一 2 および図一 3 は、それぞれNS方向およびEW方向の地震波を入力した場合の地震応答解析結果に及ぼす適用したコンクリートの構成モデルの影響を示したものである。これらの図によれば、コンクリートの構成モデルとしてType-IおよびType-IIを用いた場合の結果は、全体的によく一致しているが、Type-IIIを用いた場合は若干異なった傾向を示していることがわかる。一般的に、鉄筋コンクリート部材が降伏する前の段階では、いずれの構成モデルを用いても解析結果に殆ど差は認められないが、降伏後の段階ではType-IIIを用いた場合、繰返し載荷回数の増加に伴う除荷時および再載荷時の鉄筋コンクリート部材の剛性低下がType-IおよびType-IIを用いた場合に比べて若干著しくなっている。この差異は、Type-IIIでは、主に繰返し荷重下に

おけるコンクリートの剛性変化、特に繰返し載荷回数の増加に伴う除荷および再載荷時のコンクリートの剛性が繰返し載荷回数の増加とともに徐々に低下するという特徴があるのに対して、Type-IおよびType-IIでは、除荷および再載荷時のコンクリートの剛性が繰返し載荷回数にかかわらずほぼ初期剛性を維持しているためと考えられる。

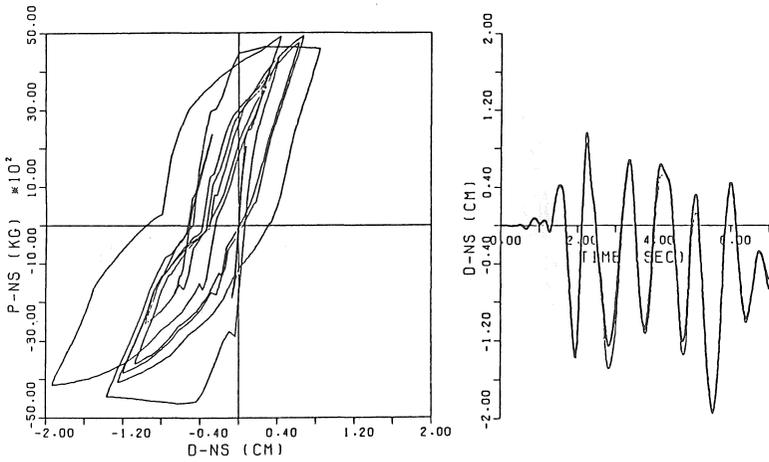
5. 2 主筋とコンクリート間の付着剛性の影響

図一 4 は、地震応答解析結果に及ぼす主筋とコンクリート間の付着剛性の影響を示したものである。図によれば、荷重一変位履歴特性および変位時刻歴応答は、いずれも主筋とコンクリート間の付着剛性によって著しく影響を受けることがわかる。すなわち、図一 4 (a)に示した主筋の完全付着を仮定した場合は、変位応答量は正負同程度であるが、主筋のすべりの影響を考慮に入れると、図一 4 (b)および(c)に示したように、主筋の完全付着を仮定した場合に比べて変位応答量が正の方向には小さくなっているが、負の方向には著しく増大しており、鉄筋コンクリート部材の劣化が負側に集中していることがわかる。特に、負側では鉄筋コンクリート部材はひずみ軟化域に達している。これは、主筋がすべるとコンクリートの負担応力が増加し、部材の劣化が促進されるためと推察される。なお、通常の付着剛性を有する場合の結果は、図一 4 (b)に示したように、主筋の完全付着を仮定した場合よりも、むしろ主筋とコンクリート間の付着剛性を0とした場合の結果に近い傾向を示す。

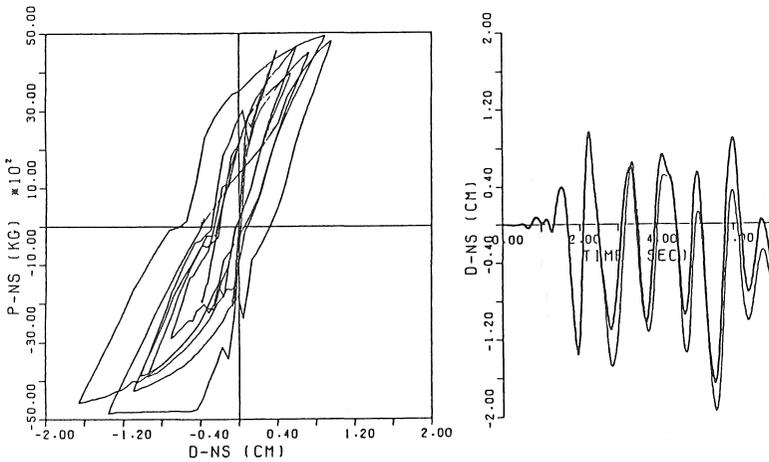
ところで、図には示していないが、部材の地震応答特性は、部材内部における主筋とコンクリート間のすべりよりも部材端における主筋の抜け出し効果



(a) エンドクロニック理論 (Type-I)

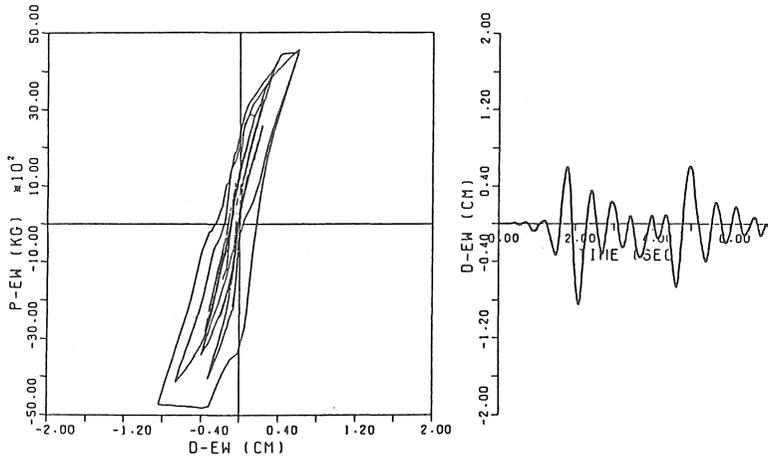


(b) エンドクロニック理論 (Type-II)

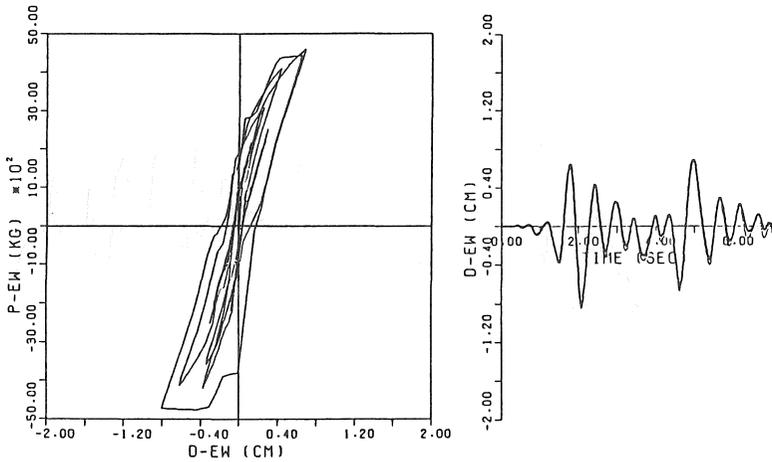


(c) エンドクロニック理論 (Type-III)

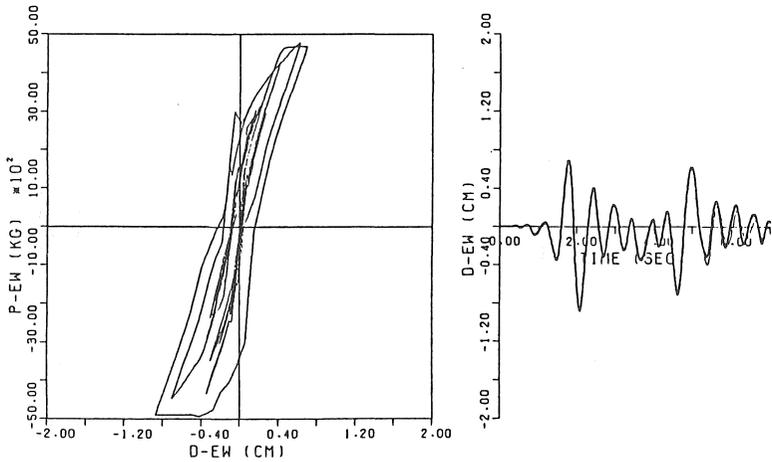
図-2 地震応答解析結果に及ぼすコンクリートの構成モデルの影響 (地震波: NS成分)



(a) エンドクロニック理論 (Type-I)

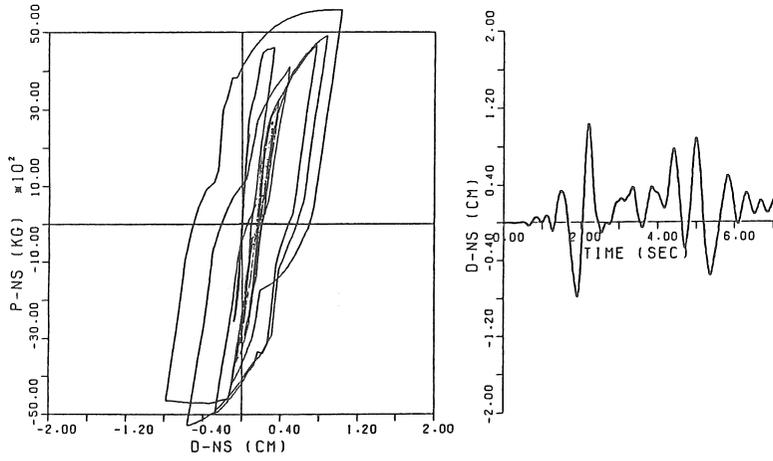


(b) エンドクロニック理論 (Type-II)

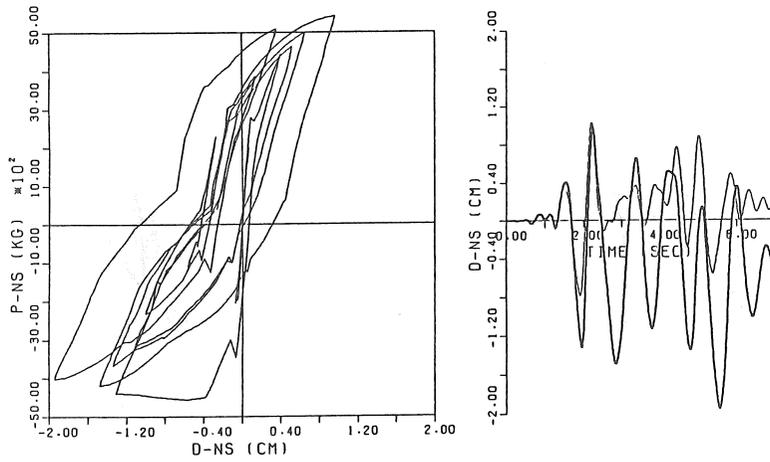


(c) エンドクロニック理論 (Type-III)

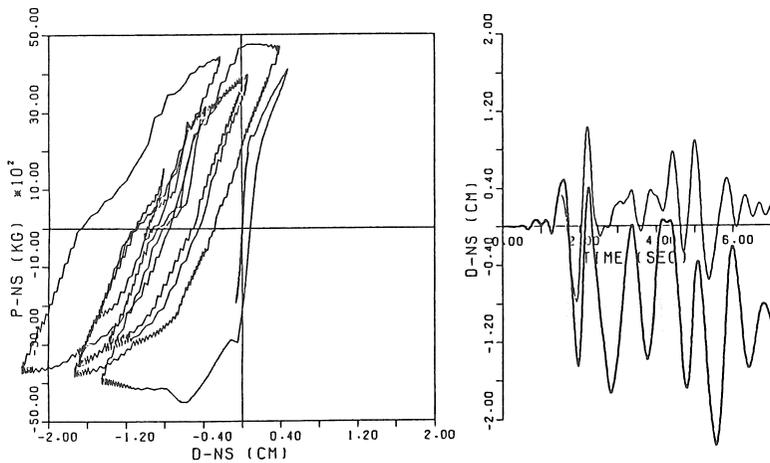
図-3 地震応答解析結果に及ぼすコンクリートの構成モデルの影響 (地震波: EW 成分)



(a) 付着剛性 = ∞

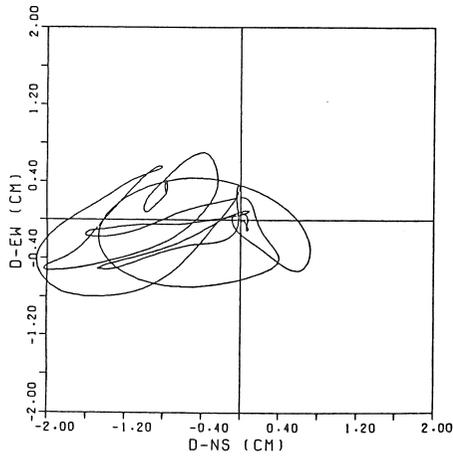


(b) 付着剛性 = 10tf/cm^3

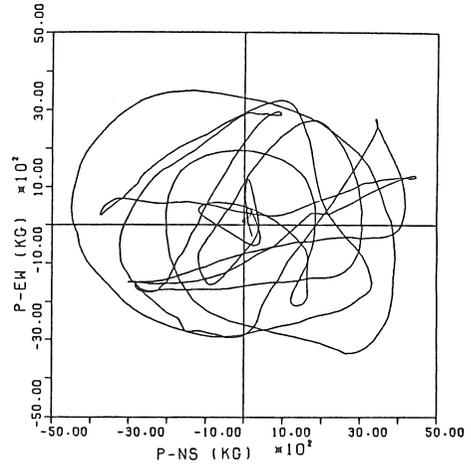


(c) 付着剛性 = 0tf/cm^3

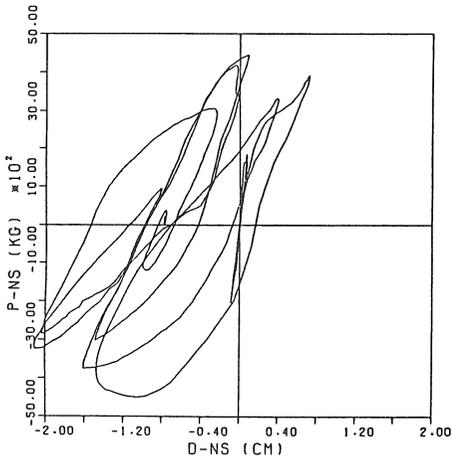
図-4 地震応答解析結果に及ぼす主筋とコンクリート間の付着剛性の影響(地震波: NS成分)



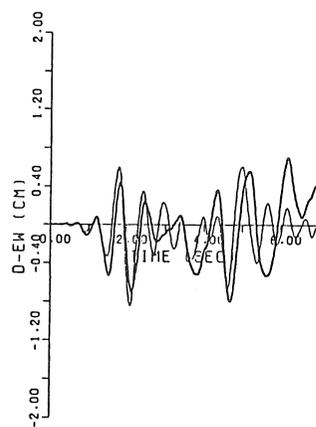
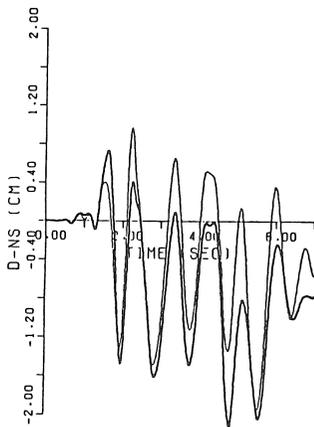
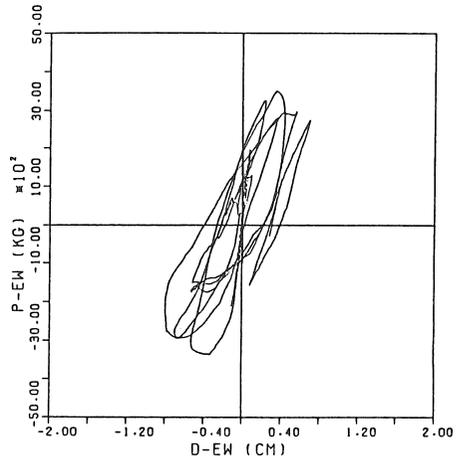
(a) 変位相互関係図



(b) 荷重相互関係図



(c) 荷重—変位履歴特性



(d) 変位時刻歴応答

図一五 地震応答解析結果に及ぼす2軸効果

により顕著な影響を受けることが明かとなった。すなわち、部材内部の主筋のすべりのみを考慮した場合には、主筋の完全付着を仮定した場合に比べて変位応答量が增大する傾向は認められるものの、定着域における主筋の抜け出しを考慮した場合に観察された部材の降伏現象は認められなかった。

5. 3 地震波の入力成分の影響

図-5は、NS方向およびEW方向の2方向地震波を同時に入力した場合の解析結果を示したものである。図によればNS方向の地震波のみを入力した場合には、前掲の図-2(a)に示したように、部材の曲げ剛性が低荷重レベルで急変するいわゆるピンチ効果が顕著に認められ、荷重-変位履歴ループの形状は荷重が0付近でくびれたような形状となっているが、2方向地震波を同時に入力した場合のNS方向の荷重-変位履歴関係は、図-5(c)から明らかのように、このようなピンチ効果は認められず、どちらかといえば図-4(c)に示した主筋とコンクリート間の付着剛性を0とした場合の結果と類似した傾向を示している。また、2方向地震波を同時に入力した場合のEW方向の荷重-変位履歴関係は、NS方向の地震波によって圧縮コンクリートが圧壊したため、EW一方向の地震波のみを入力した場合(図-3(a)参照)に比べて同一変位に対する荷重が著しく小さくなっている。

同様に、変位時刻歴応答を示した図-5(d)からも、地震応答特性における2軸効果が認められる。すなわち、NS方向またはEW方向の地震波のみを鉄筋コンクリート部材に入力した場合(図中の細線)には、変位応答量の偏りはそれほど観察されず、最大変位応答量は2方向地震外力を同時に受けた場合(図中の太線)の約81%であり、2方向外乱を同時に受けることによって、鉄筋コンクリート部材は1方向外乱のみを受けた場合に比べて劣化が促進されることがわかる。

6. 結 論

本研究では、不規則繰返し荷重を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係に対するエンドクロニック理論の適用性を、地震応答解析によって検討した。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようになる。

1) ひずみ軟化域を含む大変形領域に至るまでを解析の対象とする場合、エンドクロニック理論は

極めて有効な構成モデルであると言える。

- 2) これまでに提案されている3種類のエンドクロニック理論のうち、Type-I(1976年提案)およびType-II(1978年提案)を用いた場合の結果は、全体的によく一致しているが、Type-III(1980年提案)を用いた場合の結果は若干異なった傾向を示す。一般的に、鉄筋コンクリート部材が降伏する前の段階では、いずれの構成モデルを用いても解析結果にほとんど差は認められないが、降伏後の段階となると、Type-IIIを用いた場合には、繰返し載荷回数の増加に伴う除荷時および再載荷時の鉄筋コンクリート部材の剛性低下がType-IおよびType-IIを用いた場合に比べて若干著しくなる。
- 3) 地震応答解析結果は、主筋とコンクリート間の付着剛性の値によって著しく影響される。すなわち、主筋の完全付着を仮定した場合には、変位応答量は正負ほぼ同程度であるが、主筋のすべりの影響を考慮に入れると、主筋の完全付着を仮定した場合に比べて変位応答は特定方向に集中する傾向を示す。
- 4) 鉄筋コンクリート部材の力学特性に及ぼす部材端における主筋の抜け出しの影響は、部材内部の主筋のすべりの影響よりも著しく、部材端からの主筋の抜け出し効果のみを考慮しても、部材の地震応答特性をかなりの精度で追跡できる。
- 5) 鉄筋コンクリート部材がひずみ軟化域に達すると、2方向外乱を同時に受ける場合には、1方向外乱のみを受取る場合に比べて部材の劣化が促進されるため、地震応答特性における2軸効果が顕著に認められる。

[謝 辞]

本研究に際して御助言を賜りました名古屋大学・小阪義夫教授、並びに本解析および解析結果の整理に際して御助力を得た名古屋大学大学院生・大津弘君および三重大学学生・成田清康君(現名古屋市)に対して謝意を表します。また、本研究費の一部は文部省科学研究費補助金(一般研究(B))によったことを付記する。

[参考文献]

- 1) 谷川恭雄, 山田和夫: "エンドクロニック理論のコンクリート工学への適用," コンクリート工学, Vol.21, No.1, 昭58. 1, pp.31-43.
- 2) 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫: "エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析 (第1報: 解析手法)," 日本建築学会論文報告集, 第326号, 昭58. 4, pp.78-90.
- 3) 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫: "繰返し荷重を受ける RC 部材の力学特性に関する解析的研究," コンクリート工学年次論文報告集, 第5巻, 昭和58. 6, pp.477-480.
- 4) 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫: "エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析 (第2報: 本解析手法の特徴および解析結果と実験結果との比較検討)," 日本建築学会論文報告集, 第330号, 昭58. 8, pp.9-23.
- 5) 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫: "エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析 (第3報: 鉄筋コンクリート部材の力学挙動に及ぼすコンクリートの非均質性の影響)," 日本建築学会構造系論文報告集, 第354号, 昭60. 8, pp.1-11.
- 6) Bazant, Z. P., and P. D. Bhat: "Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete," Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol. 102, No.EM4, Aug. 1976, pp.701-722.
- 7) Bazant, Z. P., and C. L. Shieh: "Endochronic Model for Nonlinear Triaxial Behavior of Concrete," Nuclear Eng. and Design, Vol.47, 1978, pp.305-315.
- 8) Bazant, Z. P., and C. L. Shieh: "Hysteretic Fracturing Endochronic Theory for Concrete," Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol.106, No.EM5, Oct. 1980, pp.929-950.
- 9) Agrawel, G. L., Tulin, L. G., and K. H. Gers-tle: "Response of Doubly Reinforced Concrete Beams to Cyclic Loading," Jour. of ACI, Vol.62, No.7, July 1965, pp.823-836.
- 10) Brown, R. H., and T. O. Jirsa: "Reinforced Concrete Beams under Load Reversals," Jour. of ACI, Vol.68, No.5, May 1971, pp.380-390.

(受理 昭和63年1月25日)