

鉄筋コンクリート部材の復元力特性

Load-Deflection Characteristics of Reinforced Concrete Members subjected to Alternated Loading

岡田 恒男*・関 松太郎*・伊藤 秀夫*
Tsuneeo OKADA, Matsutarō SEKI and Hideo ITO

1. ま え が き

塑性域にわたる大変形領域での繰返し曲げおよびせん断をうける鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する多くの解析的ならびに実験的研究が行なわれた結果、部材の塑性領域をも考慮した鉄筋コンクリート建物の耐震設計がある程度可能になってきた。しかし、未解決のまま残された問題も多く、その中には基本的かつ重要な問題も多く含まれている。例えば数値解析の際必要な、材料特にコンクリートの繰返し応力時の応力・歪関係についてのデータの集積が少ないこと、あるいは、部材に関する多くの破壊実験が行なわれ、その結果をもとに、種々の復元力特性が提案されているにもかかわらず、その特性が、材料の特性と組合せ、応力状態、荷重履歴など非常に多くのパラメータの影響をうけるため、実験結果から一般則を導くに至っていないことなどである。

筆者らは、臨時事業研究の一環として、鉄筋コンクリート部材の多数回繰返し応力時の性質を解明する目的で

- (1) パラメータを出来るだけ少なくした実験と解析により基本的なデータを集積する。
- (2) 繰返し実験を出来るだけ簡略化するための実験方法を開発する。

ことを基本方針として研究を行なっているもので、その概要を報告する。

2. 繰返し曲げをうける鉄筋コンクリート断面の曲げモーメント・曲率関係の数値解析

鉄筋コンクリート部材は、鉄筋とコンクリートとにより構成されている構造体であるから、その特性を知るためには両者の性質を充分把握せねばならない。そこで、実験結果に基づいた両者の応力・歪関係を用いて、繰返し曲げモーメントをうける鉄筋コンクリート断面のモーメント・曲率関係の数値解析を行なった。この問題については、鉄筋とコンクリートの応力・歪関係を bi-linear 形とした青山¹⁾の研究、鉄筋の応力・歪関係に Bauschinger 効果を考慮した Agrawal の研究²⁾、コンクリートの最大歪領域における応力の低下と塑性履歴を考慮した Park の研究³⁾などがある。筆者らの方法は、鉄筋の応力・歪関係に Bauschinger 効果を考慮すると同時に、歪単調増加時と歪減少時の特性とが統一して説明できる応

力・歪関係をコンクリートに導入した点に特徴がある。

(1) コンクリートの応力・歪関係

図1は、仮定されたコンクリートの応力・歪関係を、

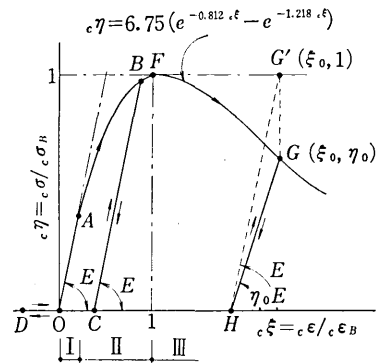


図1 コンクリートの応力・歪関係

最大圧縮応力時の応力度 $c\sigma_B$ と、その時の歪 $c\epsilon_B$ とにより規準化したものである。すなわち、(i) 圧縮歪が 0 より単調に増加する場合には、A 点までは直線性を有し、A 点をすぎると、梅村魁の e 関数法⁴⁾に用いられている指数関数で表現できるものとする。(ii) 包絡線上の点(例えば B 点)より圧縮歪が減少すると、応力は直線的に減少し C 点に到達し、応力は 0 となる。さらに圧縮歪が減少し、引張歪域に入っても応力は 0 である。(iii) 圧縮歪がふたたび増加すると、 $D \rightarrow C \rightarrow B$ をたどり包絡線上にもどる。(iv) 減力時の勾配は、包絡線からの減力開始時の歪がゾーン I, II の場合には包絡線の初期弾性勾配とし、ゾーン III の包絡線上から減力が開始される場合には、図に示した様に、初期弾性勾配に、減力開始時の規準化された応力を乗じて求める。

この応力・歪関係は、歪の単調増加時と歪減少時の挙動を統一するために、コンクリートが、図2に示した

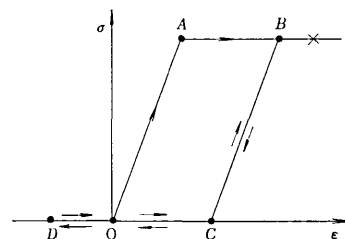


図2 コンクリートエレメント応力・歪関係

* 東京大学生産技術研究所 第1部

bi-linear 形の特性をもちエレメントの並列結合より構成されているとの仮定により導かれたものである。すなわち、図1のゾーンIではすべてのエレメントが弾性、ゾーンIIでは1部のエレメントが塑性化し、ゾーンIIIでは1部のエレメントに破壊が生じていると考えれば、すべてのゾーンの歪単調増加時の挙動と歪減少時の挙動とが矛盾なく説明できる注)。

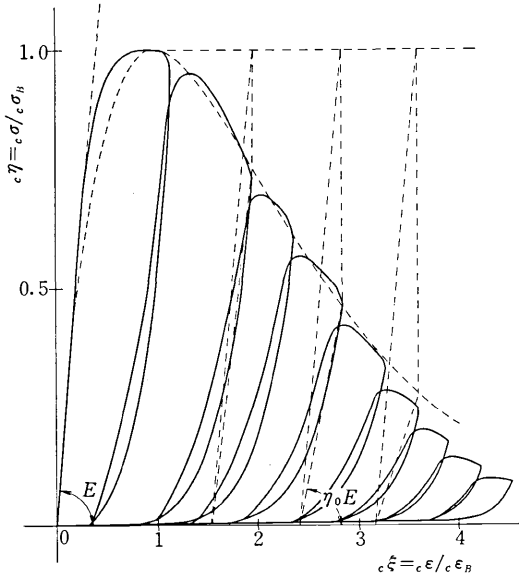


図3 コンクリートの応力・歪関係 (実験例)

図3はこの関係を確認するために直径5cm、高さ10cmのコンクリートシリンダーの試験結果と比較したものである。応力・歪関係の全体の傾向は図1の曲線で説明できるのがわかるが、歪が減少し、応力が0に近づいた領域での特性ならびに、同じ振幅での歪履歴を繰返した場合には応力の低下するいわゆるサイクル疲労特性については表現できていない。これらの点については現在、実験を継続中である。

(2) 鉄筋の応力・歪関係

図4に示したように、鉄筋の応力・歪関係は、Jenningsにより修正されたRamberg-Osgoodモデル⁵⁾を用いた。この際の定数は、後で述べる繰返し圧縮・引張力

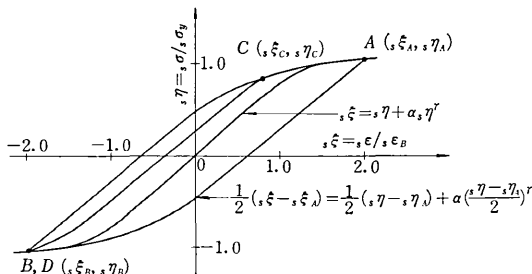


図4 鉄筋の応力・歪関係

注) この曲線の仮定に当り、本所第1部鈴木敬助教授の有益な御助言をいただいた。

を作用させた鉄筋コンクリート部材の実験結果をもとに $\alpha=0.5$, $\gamma=11$ と仮定した。

(3) 断面の曲げモーメント・曲率関係

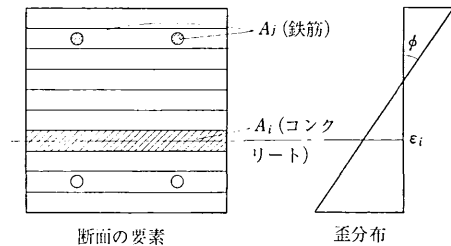
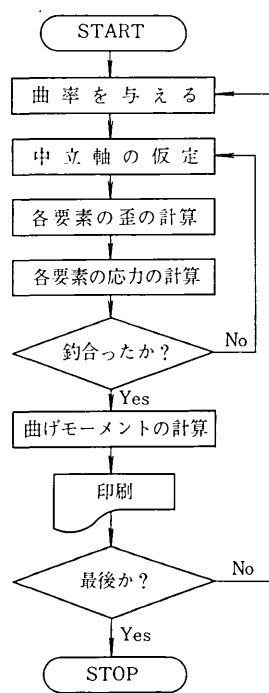


図5 断面の分割と歪分布



曲げをうける断面の曲げモーメント・曲率関係は、図5に示したように、断面をいくつかの要素に分割し、与えられた曲率に対して中立軸位置を仮定し、平面保持の仮定により、各要素の歪を計算し、先に述べた応力・歪関係より歪履歴に従って応力を計算し、軸方向力の釣合を判別し、必要とあらば中立軸位置の修正を行ない、釣合位置を求めた。計算のフローチャートの概要は図6に示した通りである。当然のことながら、断面に軸方向力のみ作用する場合には、中立軸の仮定が不要となる。

図6 計算のフローチャート概要

3. 繰返し圧縮・引張力をうける鉄筋コンクリート部材の性質

鉄筋コンクリート部材が繰返し応力をうけた場合の基本的な性質を調べるために、応力状態の最も単純な繰返し圧縮・引張力を多数回作用させた破壊試験を行なった。

試験体は図7に示したように、断面5cm×5cm、高さ15cmの鉄筋コンクリート柱8個で、主筋4-4φ、フープ2φ @ 2.5cm または 1.25cmの配筋を行ない、主筋端は鋼板に溶接した。材料の特性は、鉄筋は普通丸鋼で降伏点強度が2.4t/cm²のもの、コンクリートは豆砂利コンクリートで圧縮強度166kg/cm²のものであった。加力にはサーボモーター式材料試験機(島津オートグラフIS5000)を用いて、最大0.1Hzで圧縮力および引張力を繰返し作用させた。測定は、Wire Strain Gageを利用した変位計を用いて、試験体全長の伸びを

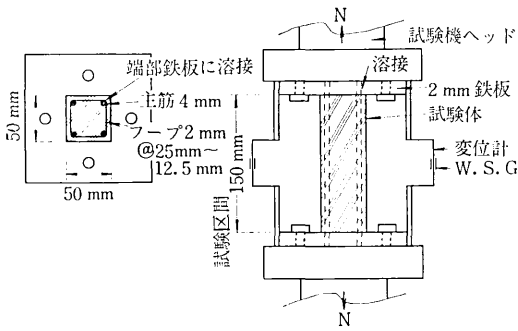


図7 試験体および加力装置

測定した。

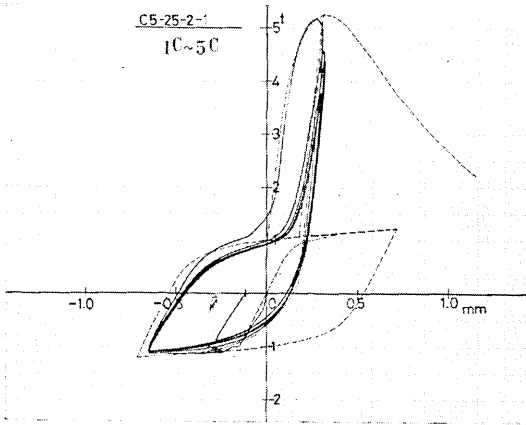
図8 a)~d)は、試験結果の例を示したものである。たて軸には軸方向力を圧縮を十として、横軸には材軸方向の変位を、縮み量を十として表示した。試験は変位で制御し、引張の変位振幅を一定(降伏変位の約4倍)とし、圧縮の変位振幅を、コンクリート圧壊時の変化を基準として、その2倍、3倍と繰返しサイクル数の増加に伴ない増加させた例である。コンクリートには圧縮が生じるため、繰返しサイクルの増加に従がい圧縮側の強

度が低下し、20 サイクル(図8 c)ていどでほとんどコンクリートでは軸方向力を負担できず、鉄筋のみが引張・圧縮力をうけている状態となる。繰返し回数がさらに増加すると、鉄筋に座屈現象が起り(約40回目)、荷重・変位曲線は不安定となった。

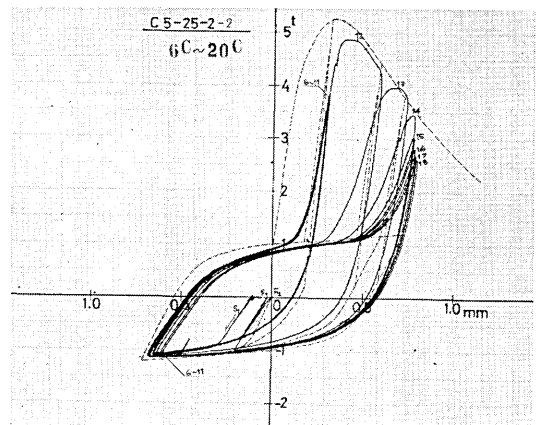
図に記入した破線は、2. で述べた応力・歪関係を用い、材軸にそった歪分布を一様と仮定して計算された荷重・変位曲線である。減力時にコンクリートの負担する応力が0に近づく領域、および、繰返し回数の増加により強度の低下する領域を除けば、計算結果は実験結果を説明できることが判る。

以上の実験と計算とにより、2. で仮定した応力・歪関係は塑性域におよぶ大変形領域での繰返し応力をうける鉄筋コンクリート部材の性質を知る有力な手段となりうること、また、コンクリートが塑性領域に入った後に繰返し応力をうけると荷重・変位曲線はほとんど鉄筋のみの荷重・変位曲線となることなどを明らかにした。

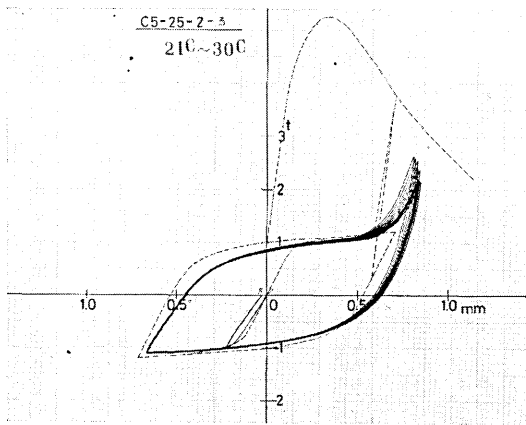
4. 繰返し曲げをうける鉄筋コンクリート部材の性質
多数回繰返し曲げをうける鉄筋コンクリート部材の特性を知るために、図9に示した片持梁形式の部材に、本



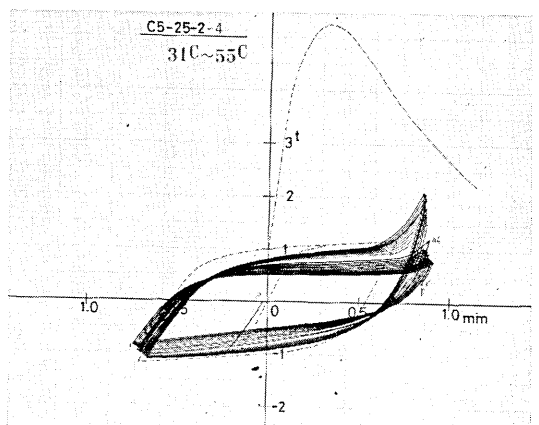
(a)



(b)



(c)



(d)

図8 繰返し圧縮・引張力をうける鉄筋コンクリート柱の荷重・変位曲線

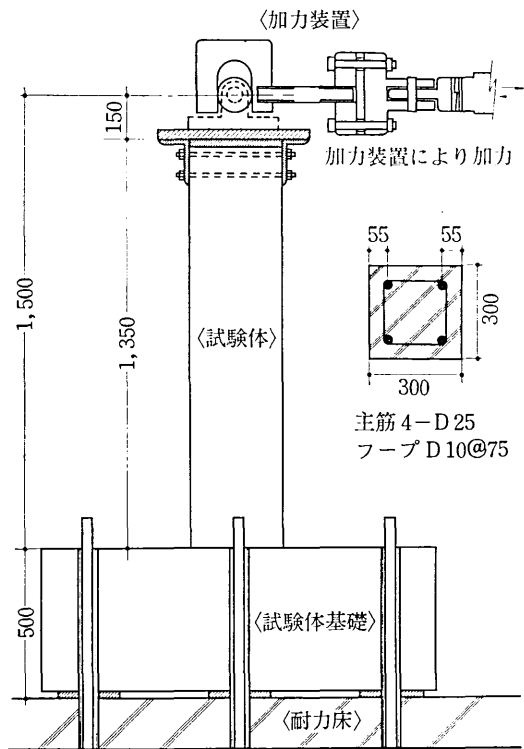


図9 繰返し曲げ試験

所千葉実験所に新設された構造物動的破壊試験装置を用いて、多数回の繰返し水平力を作用させた破壊実験の結果について述べる注。

(1) 試験方法

試験は図9に示した様に試験体の基礎部を試験床に固定し、試験体頂部に加振器により水平力を加えた。試験は変位振幅制御で行ない、降伏点変位の2倍を基準とした定常変位試験と、あらかじめ試験体をその一部とする建物を想定し、その建物の地震時の非線形応答解析を行ない、得られた建物の応答変位より試験体の応答変位を計算し、その応答変位を直接試験に用いた応答変位試験とを行なったが、後者については別の機会に報告する。

(2) 試験体

図9に示したように断面30cm×30cm、高さ135cm(加力用アタッチメントを含めると、実質的なせん断スパンは150cm)の形状をもち、配筋は主筋として4-D25、フープとしてD10@7.5cmを用いた。主筋の降伏強度は3.6t/cm²、コンクリート圧縮強度は平均444kg/cm²であった。

(3) 結果

図10a), b)に頂点の水平力と水平変位との関係の例を示した。すなわち、最初、変位振幅を±2cm(部材角1/75)で、約250回の繰返し試験を行なったが、第

注) 厳密には、部材には曲げとせん断力が同時に作用している。しかし、材のプロポーションからみて、曲げの影響の支配的な部材であるので、ここでは、一応曲げ試験として取扱う。

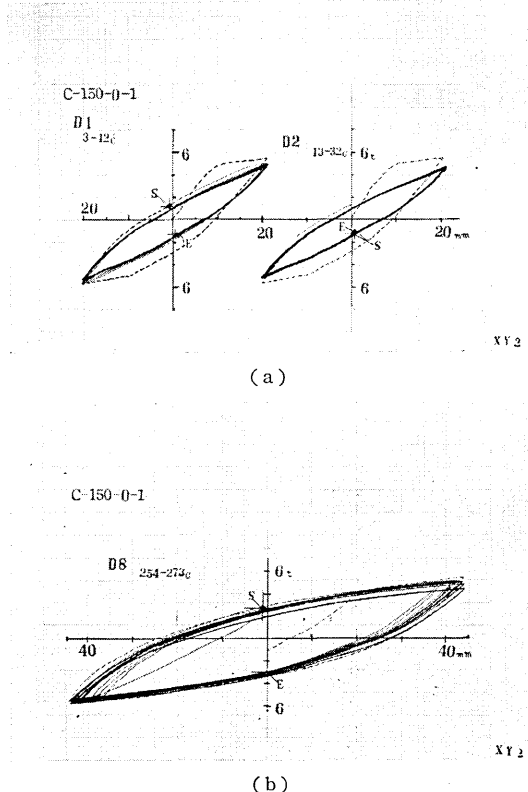


図10 繰返し曲げをうける鉄筋コンクリート部材の荷重・変位曲線(実験例)

1サイクルでは図10a)の破線に示す履歴を示し、その後、繰返し回数の増加に伴ない強度が低下したが、数回の繰返しにより履歴曲線は図10a)の実線で示した様にほぼ安定した紡錘形となった。さらに同一振幅での繰返し加力が続けると約90サイクルで、柱脚に曲げ亀裂が生じ、柱脚部のコンクリートにも圧壊がわずかに生じたが、履歴曲線としては、約250サイクルまで顕著な変化は見られなかった。その後、変位振幅を2倍に増大させ繰返し試験を行なったが、図10b)に示した様に、通算約300サイクルまで、ほぼ安定した履歴曲線が得られた。しかし、この間コンクリートの圧縮、曲げせん断亀裂の進展などが観察され、通算326回で鉄筋が破断し、耐力を失なった。

(4) 解析結果との比較・検討

図11は、2.で述べた方法により、この試験体の荷

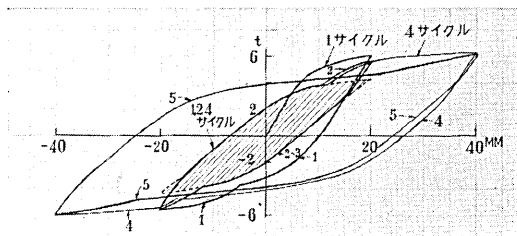


図11 繰返し曲げをうける鉄筋コンクリート部材の荷重・変位曲線(解析例)

重・変位曲線を解析したものである。計算の際には、コンクリートは断面丈方向に 10 等分し、鉄筋は断面上端および下端より 5.5 cm の位置にそれぞれ 2 本の鉄筋が集中しているものとした。また、得られたモーメント・曲率関係より荷重・変位関係を求める際には、材軸にそった曲率分布を曲げモーメントの分布と相似形であると仮定した。

図 10 a) および b) と図 11 との比較により、解析の結果は実験値を比較的良好に再現できていると言える。特に第 2 サイクル以降はほとんど鉄筋のみで構成されている断面の特性に近ずき、履歴曲線が安定する傾向が明らかである。(図 11 のハッチ部は鉄筋のみで構成されている断面の荷重・変位曲線)

5. 結 び

以上、鉄筋コンクリート部材の地震時の特性を知るために、コンクリートの繰返し圧縮試験、鉄筋コンクリート部材の繰返し圧縮・引張試験および繰返し曲げ試験を一貫して行ない、コンクリートと鉄筋の非線形応力・歪関係に基づいた解析結果との比較・検討により、今回取扱った範囲の鉄筋コンクリート部材では、部材が塑性域に入る大変形領域では、履歴特性にコンクリートの寄与する割合は少なく、特に繰返し回数が増加すると、鉄筋のみの特性に近づくこと、また、今回用いた数値解析法でその性質が説明できることなどを明らかにした。

しかし、コンクリートの減力時の曲線の仮定、サイク

ル疲労の評価、曲げ材の材軸にそった曲率分布の評価、せん断力伝達機構、鉄筋とコンクリートとの付属機構、軸方向力と曲げとを同時にうける場合の特性など、今回検討に至らなかった項目も多く、これらについては、順次、基本的に追求してゆきたいと考えている。

謝 辞

本研究に際し、本所、田中・高梨研究室の御指導・御協力をいただいた。また、実験の際には、李利衡氏(本学大学院)および矢島秋彦氏(大成建設 KK)の御協力を得た。

(1972 年 12 月 8 日受理)

参 考 文 献

- 1) 青山博之「軸方向力と繰返し曲げを受ける RC 部材の履歴特性」日本建築学会論文報告集 No. 103, S. 39
- 2) Agrawal, G. L. Tulin, L. G. and Gerstle, K. H. [Response of Doubly Reinforced Concrete Beams to Cyclic Loading], Journal at the American Concrete Institute, Vol. 62, No. 7, July 1965
- 3) Park, R., Kent, D. C. and Sampson, R. A., [Reinforced Concrete Members With Cyclic Loading], Proceeding of the American Society of Civil Engineers, ST 7, July 1972.
- 4) 梅村 魁「鉄筋コンクリート梁の塑性変形および終局強度」日本建築学会論文報告集 No. 42, S. 26
- 5) Jenning P. C [Earthquake Response of a Yileling Structure.] Proc. of A. S. C. E Vol 91, EM 4, August 1965, p. 41-68
- 6) 岡田恒男, 他「多数回繰返し応力を受ける鉄筋コンクリート部材の復元力 (I), (II), (III)」日本建築学会大会学術梗概集 S. 47

