

# [82] 繰り返し曲げ応力下のコンクリートの履歴挙動に関する研究

正会員 森田司郎(京都大学)

正会員 〇須藤英司(日建設計)

## 1. 研究目的

繰り返し高荷重をうける部材の疲労挙動の解析には、素材の応力-ひずみ履歴特性をなるべく忠実に考慮したモデルを用いることが望ましく、特にコンクリートに付しては、繰り返し荷重による塑性ひずみの累積現象を評価できるモデルの設定が必要である。鋼については、すでに塑性ひずみの累積疲労現象を比較的簡単なモデルを用いて解析的に説明されているが、コンクリートについては、一軸圧縮下の応力-ひずみモデルについては精粗さまざまなモデルが提案されているものの、これを曲げ材に応用して検証した例は見当らない。そしてシリンダー等による圧縮試験から求めた最大応力以後の履歴は供試体固有の崩壊モードに左右されて、一般性の点で疑問がある。コンクリートの曲げ応力下の挙動を調べるためには、鉄筋コンクリートとしての挙動からの抽出比較の形をとるため、直接的な比較が困難であることが1つのネックである。本研究はブレンコンクリートの曲げ圧縮時の履歴を追跡することによって、応力減退域を含む劣化モデルの検証を行なった。すなわち、15×15 cm断面をもつ片持梁形式の供試体について、一定軸力下で先端水平力を制御することによって、定軸力繰り返し曲げ載荷を行ない、3箇所の断面でのひずみ履歴を測定して、 $M-\phi$ 関係、平均ひずみの累積、塑性疲労耐力等を求めた。さらに、Darwinモデルに修正を加えたモデルを用いて、種々の載荷履歴下の実験供試体断面の挙動を解析し実験結果と比較した。

## 2. 実験計画

片持ち梁形式の角柱供試体を図-1に示す。供試体は断面15×15 cmの角柱と断面30×30 cmのベース部からなる。正負の水平方向力は幅8 cmの鋼板を介して柱脚部断面より45 cmの位置に加えられ、軸方向力は水平力載荷方向のヒンジを介して柱先端に載荷される。載荷装置は、動力、水平力ともに電気油圧式ジャッキによった。軸力の大きさは、コンクリートの曲げひびわれを許さずに、少数回の正負繰り返し曲げによって疲労破壊を生じるように選び、本実験では $\frac{2}{3} f_c BD$ とした。定軸力を与えた後、水平力を、図-1のHとMレベルの平均ひずみが所定の値に達するまで加え、そのときの水平力の大きさを振幅とする両振り定水平荷重振幅試験、および水平加力位置での水平変位を制御する定水平変位振幅試験を基本とした。図-1に示すH、M、Lの3箇所の位置にゲージ中心が合うようにゲージ長68 mmの抵抗線ひずみ計(WSGと略記)を角柱の4側面の中心線に沿って貼り、その測定値で各レベルでのひずみを表わすと仮定した。さらに柱脚断面より15 cmのレベルに鋼棒をとりつけ、図-1のように、ベース上面との間の変位を電気式変位計(LTFと略記)で測定した。この測定値は柱脚断面のベースへのめりこみ量を含んだ変形を示す。水平加力位置で電気式ダイヤルゲージ(DGと略記)で測定した水平たわみから、 $P-\delta$ 効果による付加モーメントを算定して実験結果を補正した。実験は供試体6個を1シリーズとする合計3シリーズよりなるが、そのうち1シリーズは中心圧縮破壊を行なったものおよび一方の縁ひずみを常に零に保つように偏心圧縮荷重を軸力と水平力の組合せをコントロールすることによって与えながら単調に破壊に至らせたものよりなっている。実験に用いたコンクリートは $W/C = 73\%$ 、配合比1:3.9:2.8の普通コンクリートで、供試体は縦打ちとし、同時に $\phi 15 \times 30$  cmシリンダーを打設した。コンクリートの品質を表-1に示す。IIIシリーズの結果から $f_c$ と $f_{c'}$ はほとんど等しいとしてよいことがわか

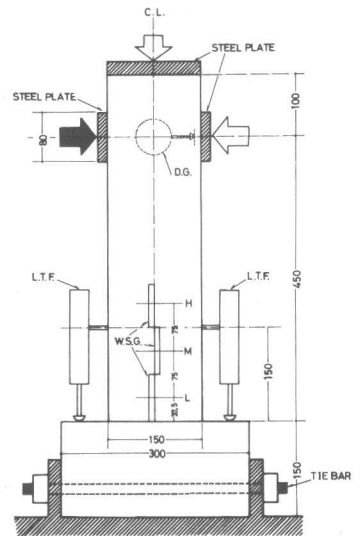


図-1 片持ち梁供試体

表-1 コンクリートの品質

シリーズ	I	II	III
$f_c'$	288	269	264
$f_t'$	28.3	24.9	21.6
$f_c$			253
$\epsilon_c$	2.02	1.96	1.90

$f_c'$  =  $\phi 15 \times 30$  シリンダー圧縮強度  
 $f_t'$  = " " 圧縮強度  
 $f_c$  = 角柱圧縮強度  
 $\epsilon_c$  = 最大応力時のひずみ(%) (強度の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ )

る。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊位置, 破壊モード…

ベース部の拘束のためにL断面近傍をはずれ, M断面よりやや上部を中心とした圧壊を生じる。繰り返しのひずみの累積によって, 各部ひずみは4~5%程度まで進行するが, WSGでのひずみ測定が圧壊直前まで可能であったことからわかるように, 目視では損傷を認められない状態でひずみが累積して最終破壊に至る。

#### 3.2 モーメント-曲率関係…

図-2にモーメント-曲率関係の実験結果を2例についてだけ

示す。E-1供試体は定軸力 $\frac{2}{3}f_c'BD$ , 第1回目水平力載荷時の縁ひずみのH位置とM位置との平均値が2.5%の時を上限荷重として, 正負両振り定荷重振幅を与えた場合のM- $\phi$ 曲線を示す。第1サイクルの履歴より第2サイクルは曲率が少なく, 以後順次曲率が增大する側に平行移動し, 第1サイクルのループを經過してから, 12回目で疲労破壊を生じている。E-2は同じ定軸力, 第1回水平載荷時M, H平均ひずみ2.7%の定荷重振幅であり, ループの遷移の傾向はE-1と同様であるが, 高ひずみ領域を反映してループの囲む面積が増大し, 第4サイクルで破壊に至っている。定たわみ振幅を与えた供試体は, たわみ進行とひずみ進行が正確には対応せず, 定曲率試験とならなかったため実験結果の表示を省略する。

#### 3.3 縁ひずみ, 平均ひずみの進行…

図-3にE-1供試体の縁ひずみ, 断面中央でのひずみ(平均ひずみ)の繰り返し載荷による累積を示す。両ひずみ共にサイクル数の増大に応じてほぼ直線的にひずみが累積し, 破壊時に急速に増大する。Lレベルのひずみは累積が少なく, 最終段階の縁ひずみはM, Hレベルのそれより小さくなるのは, ベース部の拘束効果によって, 破壊位置がMレベルよりやや上方を中心と生じることに対応している。破壊時の縁ひずみは4.5%程度, 平均ひずみは2.5%程度に達し, しかも破壊直前まで顕著な圧縮ひびわれを生じない。これは断面内にひずみ勾配をもつ曲げ応力の繰り返しのために, コンクリートの組織が一様に軟化するためと思われ, 静載荷の場合と顕著な差異を示している。

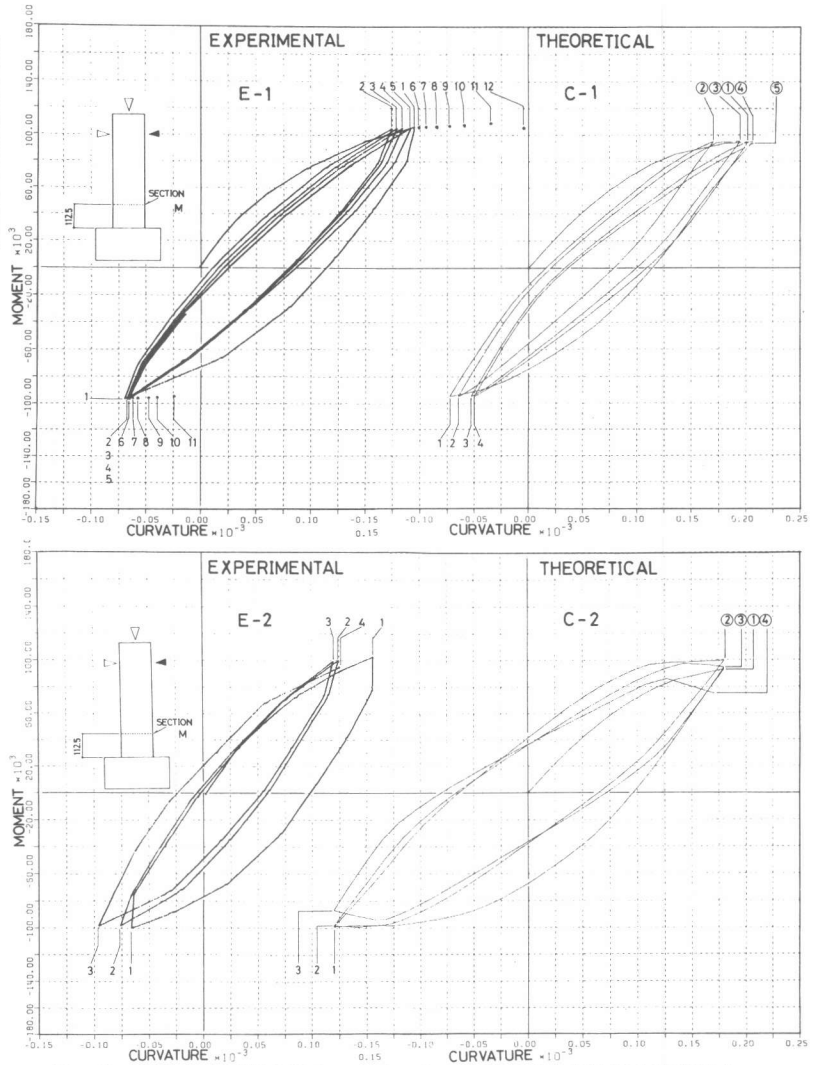


図-2 定軸力水平加力時のモーメント-曲線関係(実験値と計算値)

#### 4. 応力-ひずみ曲線モデル

一軸圧縮の繰り返しをうける場合の応力-ひずみ関係のモデルは、最大応力以後の領域まで含めて、多くの提案がある。しかし、繰り返しによるひずみの累積、耐力劣化を考慮できるものは、Jirsaの研究<sup>1)</sup>にはじまる、コンポジットを定義するモデルの類形に限られる。本研究では解析の容易さと、履歴への忠実さの観点から、Darwin等の提案モデル<sup>2)</sup>を修正して用いた。これを図-4に示す。Darwinモデル(図-4で $\alpha = 1$ としたもの)では単軸圧縮繰り返しに対しては、本実験の結果ともよく対応するものの、圧縮曲げ繰り返しに対しては、 $\epsilon_c$ 以上のひずみ領域での塑性ひずみの累積を説明できないことが試算より明らかになったので、 $\epsilon_c$ より $d\epsilon_c$ まで最大応力維持区間を加えた。試行錯誤の上、 $\epsilon_c = 2.0\%$ (圧縮試験結果に基づく)、 $\alpha = 1.75$ として以下の解析を行なった。なお、 $\epsilon_c$ 以前の包絡線は解析対象から判断して、2次曲線として簡素化した。

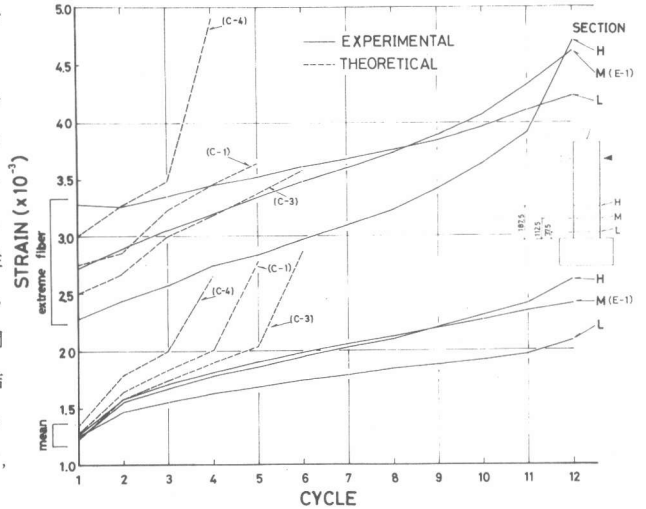


図-3 繰り返し荷重による緑ひずみ・平均ひずみの累積

#### 5. 解析結果と考察

実験に用いた供試体断面、実験時のコンクリート強度( $f_c' = 269 \text{ kgf/cm}^2$ )を用いて、10回オーダーのサイクル数で破壊に至る高応力サイクル疲労を解析対象とした。断面を20個のセグメントに分割し、各セグメントの重心の応力、ひずみでそのセグメントを代表させる。C-1は定軸圧( $\frac{2}{3} f_c'$ )、定モーメント振幅正負繰り返しを与えたもので、第1回正モーメント時の縁ひずみが2.75%となるときのモーメント値をモーメント振幅としたものである。

本報告に示した解析結果の荷重パターンを表-2に:  $\sigma_{cp1} = \frac{5}{6} \sigma_{en1}$  2:  $\sigma_{cp2} = \sigma_{en2} - \frac{1}{6} f_c$  3:  $\sigma_{cp3} = \sigma_{en3} - \frac{1}{6} f_c$  4:  $\sigma_{cp4} = \frac{2}{3} \sigma_{en4}$   
 示す。図-2にC-1およびC-2のモーメント-  $\sigma_{tp1} = \frac{1}{2} \sigma_{en1}$   $\sigma_{tp2} = \frac{1}{2} f_c$   $\sigma_{tp3} = \sigma_{en3} - \frac{1}{3} f_c$   $\sigma_{tp4} = \frac{1}{3} \sigma_{en4}$

$$\text{PARABOLA: } \sigma_{en}/f_c = -(E_{en}/E_c)^2 + 2(E_{en}/E_c) \\ E_p/E_c = 0.145(E_{en}/E_c)^2 + 0.13(E_{en}/E_c)$$

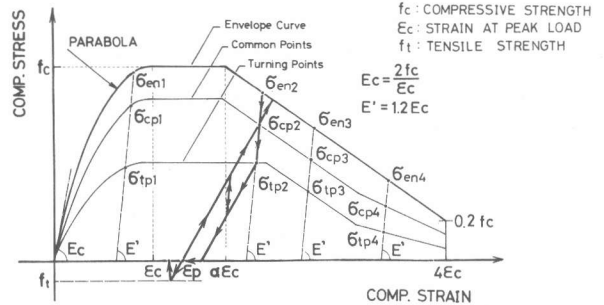


図-4 応力-ひずみ曲線モデル

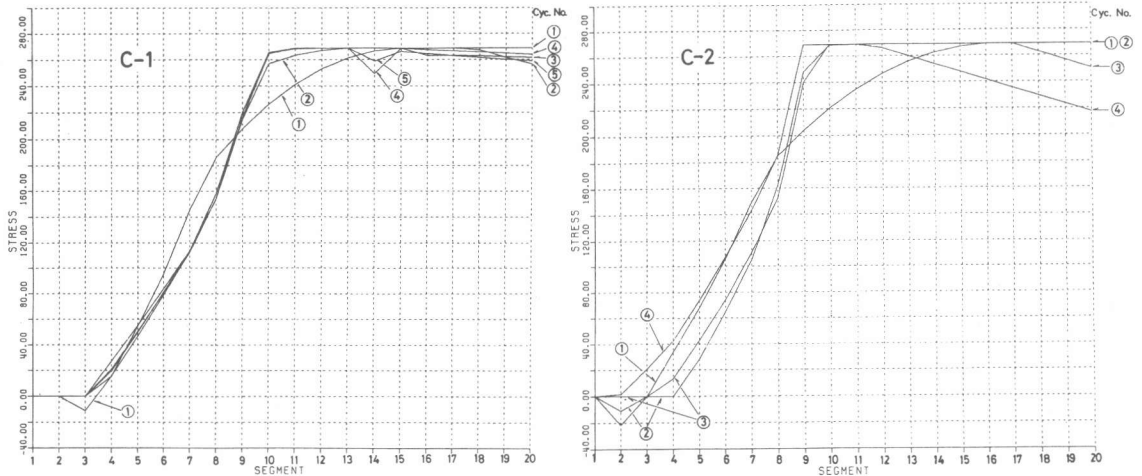


図-5 一定軸力繰り返しモーメント作用時の断面内応力分布の推移

表-2 解析時の載荷パターン

記号	定軸力	載荷パターン	第1回正モーメント 上限時繰りひずみ
C-1	$\frac{2}{3} f_c' BD$ = 40.0 TON	両振り定モーメント振幅	2.75 ‰
C-2		両振り定曲率振幅	2.50 ‰
C-3		両振り定モーメント振幅	2.50 ‰
C-4		両振り定モーメント振幅	3.00 ‰

曲率関係を示す。C-1と同一の載荷履歴をもつ実験結果E-1と比較して、解析結果の破壊までの範囲で極めてよい一致を見ることができる。C-2は表-2に示す条件下での定曲率振幅繰り返しであるが、これに対応する実験結果が得られていないので直接の比較はできないが、破壊時直前までのループ形状は実験結果とかなりよく一致している。しかし、実験では解析で与えられるような低サイクル数では破壊に至らず、劣化の進行はかなり遅かった。図-3にはC-1, C-3, C-4の繰りひずみおよび平均ひずみの進行の解析結果が示されている。実験結果と比較してひずみの累積が急速に過ぎるが、低サイクル疲労の傾向をある程度表現できているものと思われる。平均ひずみが $\epsilon_c = 2.0 \text{ ‰}$ を越えると再分布の余地がなくなって破壊にいたることを示している。破壊サイクルでひずみが急激に進行することから、繰りひずみの終局値はそのサイクルでのピーク時に破壊領域に入るか、その直前か、で大きく異なる。図-5はC-1およびC-2の断面内応力分布を、各サイクルの正モーメント上限値の時について示したものである。

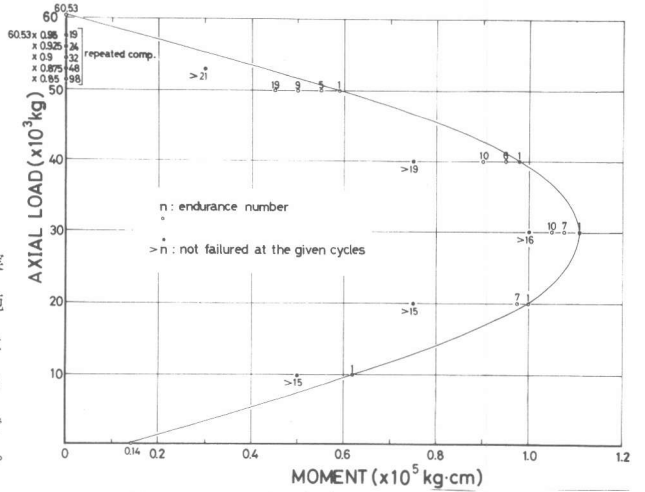


図-6 低サイクル疲労を考慮したN-M Interaction curve

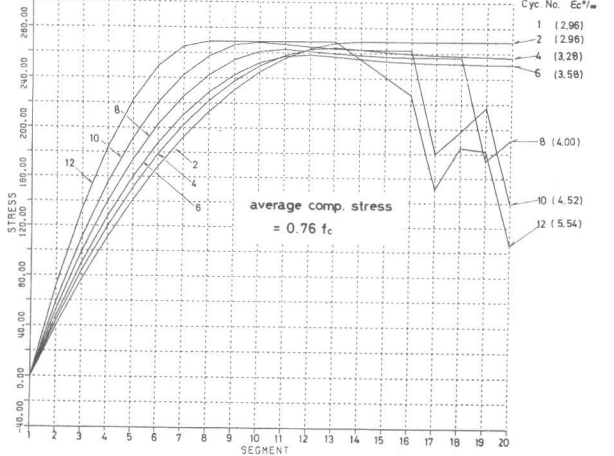


図-7 中立軸固定繰り返し曲げ圧縮時の応力分布の推移

図-6では、定モーメントを与えるために応力の再分布が、断面中央部で増大、引張部で減少の方向に生じ、それが限界に達して破壊に至ることを示す。この応力分布の解析結果が4~5サイクルで不規則な分布を与え、これが破壊の判定に影響することが考えられる。これは解析上の不備である。C-2では応力の再分布が急激に進行し、累積ひずみの急激な進行を示しているが、この点についてはさらに正確な実験的検証を必要としよう。このように、図-4に示した応力-ひずみ曲線モデルはかなり有効であると思われるので、これを利用して、定軸力レベルを種々に変化させて、正負定モーメント繰り返し耐力を求めた結果を図-6に示す。高軸力範囲では10回程度の曲げ繰り返しで、曲げ耐力は約10%の低下を示す。図-7は、梁の曲げ圧縮域を想定して、中立軸を固定し、一定軸力の繰り返しを与えた場合の応力分布の変化を求めたもので、初期繰りひずみ3.0‰に対応する軸力の繰り返しで、12サイクルで軸力を保持できなくなり、そのときの累積ひずみは5.5‰に達している。

6. 結論…普通コンクリートの一定軸力下での曲げ疲労を実験的に求め、応力-ひずみ関係モデルの仮定からはじめた解析結果と比較した結果、仮定したモデルは繰り返しによる劣化を過大に見積る欠点を有するものの、低サイクル疲労過程をかなり表現することができる。

(参考文献)

- 1) Karsan, I. D., and Jirsa, J. O., "Behavior of Concrete Under Compressive Loadings," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 95, No. ST12, Proc. Paper 6935, Dec., 1969, pp. 2543-2563.
- 2) Darwin, D., and Pecknold, D. A., "Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete," *Civil Engineering Studies*, SRS No. 409, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill., July, 1974.