

# 鉄筋コンクリート部材の復元力特性 (第2報)

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

関 松太郎\*・岡田 恒男\*

Matsutarō SEKI and Tsuneo OKADA

## 1. ま え が き

筆者らは、今まで鉄筋コンクリート建物の耐震性能を評価し耐震設計法を確立するために、鉄筋コンクリート曲げ部材の非線形領域における特性を実験および解析により研究を行ない、すでに生産研究など<sup>1),2)</sup>に発表してきた。

本報は、臨時事業研究の一環として、さらにひきつづいて解析的研究を行なったもので、図1に示した鉄筋コンクリート曲げ部材がその頂部に一定振幅の定常繰返し変位と、地震時に建物を受けるような非定常繰返し変位を受ける時(以下、それぞれ定常波試験および応答波試験とよぶ)の解析方法について述べたものである。特に本報では、解析結果の詳細ならびに実験結果との比較に重点をおいている。

## 2. 解 析 方 法

本来、鉄筋コンクリート部材は鉄筋とコンクリートで

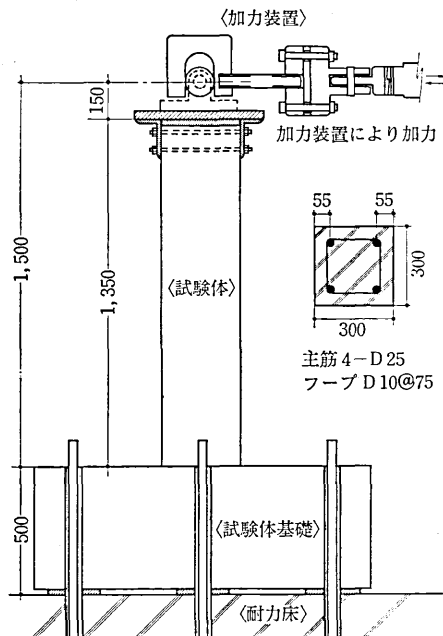


図1 繰返し曲げ試験

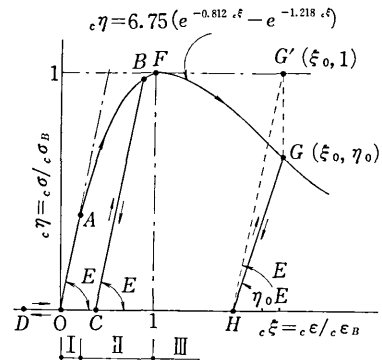


図2 コンクリートの応力・歪関係

構成されているために、その特性はさまざまな影響要素が存在し複雑である。そこで特に今回は実験結果に基づいて鉄筋とコンクリートの非線形領域での応力・歪関係を決め、繰返し変位をうける鉄筋コンクリート部材断面のモーメント・曲率関係の数値解析を行なった。鉄筋とコンクリートの応力・歪関係については、従来いろいろな研究<sup>3),4),5)</sup>がなされているが、本報では以下で述べるような仮定に基づいている。

### (1) コンクリートの応力・歪関係

図2にコンクリートの非線形応力・歪関係を縦軸はコンクリートの最大応力、横軸はコンクリートの最大応力時の歪でそれぞれ規準化した値で示す。これらの細かいルールに関しては文献1),2)を参照されたい。特にこの応力・歪関係は梅村魁博士の $\epsilon$ 関数法<sup>6)</sup>を用いており、減力時の勾配を減力開始時の応力度によって変化させた点に特徴がある。しかし、シリンダーの圧縮・引張試験による手元の繰返し実験データを参照すると、厳密な意味では、1) 最初に引張応力を受ける時は多少の力を負担する。2) 一担応力0に減力されてから再び加力される時の勾配が過少評価の傾向があり、それが解析結果の荷重・変位関係にあらわれているなどの問題点があり、今後検討の余地があらうと思われる。

### (2) 鉄筋の応力・歪関係

図3に鉄筋の非線形応力・歪関係を示す。従来、鉄筋の応力・歪関係に関しては歪硬化を無視した完全弾塑性型、歪硬化を考慮したBi-Linear型などのモデルが提案

\* 東京大学生産技術研究所 第1部

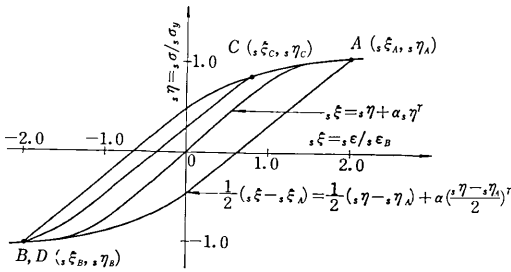


図3 鉄筋の応力・歪関係

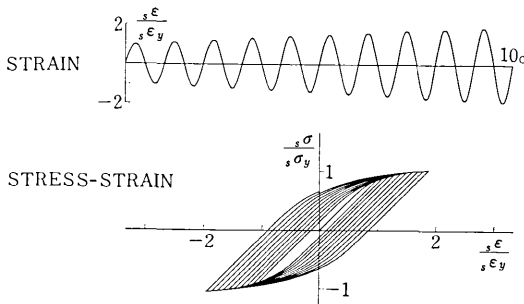


図4 鉄筋の応力・歪関係 (計算例, その1)

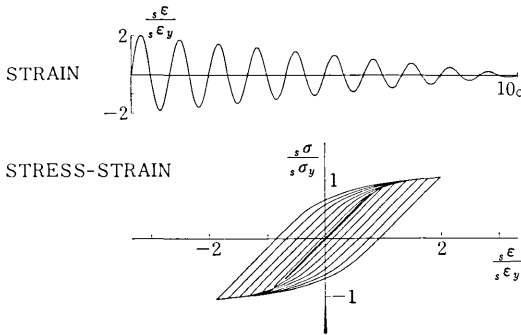


図5 鉄筋の応力・歪関係 (計算例, その2)

されているが、本報は手元の実験データを参照した結果、Ramberg-Osgood-Function による Jennings 型モデル<sup>7),8)</sup>を用いた。このモデルは図3によると2つの定数  $\alpha, \gamma$  によって定まる関数で、0 から A 点に向かうスケルトン・カーブと A 点から減力する時は A 点に対称な B 点をめざすブランチ・カーブの2つの曲線より成り、鉄筋の繰返しによる非線形領域での力学的特性をよくあらわしているものと思われる。なおこの関数は、応力の陰関数で、しかも高次式であるために解法には Newton-Raphson による収れん法を用いた。

図4、図5に今回用いた Jennings 型モデルで  $\alpha=0.5, \gamma=11$  による応力・歪関係の例を示した。各図の上段には歪を sin 曲線で 10 cycle 与え、下段は歪に対する応力を計算したものである。図4は歪が徐々に大きくなる場合で、図5は逆に小さくなる場合である。

なお、応力・歪関係の第1サイクルには明瞭な降伏点

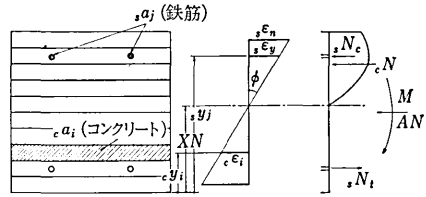


図6 断面の分割と応力・歪分布 (図中の  $s\epsilon_n$  は  $c\epsilon_n$ ,  $s\epsilon_j$  は  $s\epsilon_j$  に訂正)

をもつルールを組み込む必要があるかと思われるが、今回は Jennings 型モデルに忠実なものを使用した。

(3) 断面の曲げモーメント・曲率関係の計算方法

(a) 曲げを受ける断面の曲げモーメント・曲率関係は、図6に示すように断面をいくつかの要素に分割して曲率を与える。

$$\tilde{\phi} = \phi^* + \Delta\phi \tag{1}$$

ただし、 $\phi$  = 曲率

$$\tilde{\phi} = \phi \cdot D$$

$D$  = 断面の丈

$\Delta\phi$  = 曲率の増分

$\phi^*$  = 前ステップの曲率

(b) コンクリートおよび鉄筋要素の歪計算  
圧縮側コンクリート最外縁要素の歪:

$$c\epsilon_n = c\epsilon_n^* \cdot \frac{\tilde{\phi}}{\phi - \Delta\phi} \tag{2}$$

ただし、 $c\epsilon_n$  = 最外縁要素の歪

$$c\epsilon_n = \frac{c\epsilon_n}{c\epsilon_B}$$

$c\epsilon_B$  = コンクリート最大応力時の歪

$c\epsilon_n^*$  = 前ステップの歪

各々のコンクリート要素の歪:

$$c\epsilon_i = c\epsilon_n - (c\tilde{y}_n - c\tilde{y}_i) \cdot \frac{\tilde{\phi}}{c\epsilon_B} \tag{3}$$

( $i=1, 2, \dots, n$ )

ただし、 $c\epsilon_i$  = コンクリート要素の歪

$$c\epsilon_i = \frac{c\epsilon_i}{c\epsilon_B}$$

$c\tilde{y}_i$  = コンクリート要素の原点からの距離

$$\left( = \frac{c\tilde{y}_i}{D} \right)$$

$n$  = コンクリート要素の分割数

鉄筋要素の歪:

$$s\epsilon_j = c\epsilon_n - (c\tilde{y}_n - s\tilde{y}_j) \cdot \frac{\tilde{\phi}}{c\epsilon_B} \tag{4}$$

( $j=1, 2, \dots, m$ )

ただし、 $s\epsilon_j$  = 鉄筋要素の歪

$$s\epsilon_j = \frac{s\epsilon_j}{c\epsilon_B}$$

$s\tilde{y}_j$  = 鉄筋要素の原点からの距離  $\left( = \frac{s\tilde{y}_j}{D} \right)$

$m$  = 鉄筋要素の分割数

(c) コンクリートと鉄筋要素の応力計算  
 コンクリートおよび鉄筋の応力は、それぞれ図 2, 図 3 の非線形応力・歪関係より求める。  
 コンクリートの合力:

$$c\tilde{N} = \sum_{i=1}^n c\eta_i \cdot c\tilde{a}_i \quad (5)$$

ただし,  $c\sigma_i$  = コンクリート要素の応力

$$c\eta_i = \frac{c\sigma_i}{f_c}$$

$f_c$  = コンクリートの最大応力

$$c\tilde{a}_i = \text{鉄筋要素の断面積} \left( = \frac{c a_i}{B \cdot D} \right)$$

$B$  = 断面の幅

鉄筋の合力:

$$sN = \sum_{j=1}^m s\eta_j \cdot s\tilde{a}_j \quad (6)$$

ただし,  $s\sigma_j$  = 鉄筋要素の応力

$$s\eta_j = \frac{s\sigma_j}{f_c}$$

$$s\tilde{a}_j = \text{鉄筋要素の断面積} \left( = \frac{s a_j}{B \cdot D} \right)$$

断面の軸方向の合力:

$$\tilde{N} = c\tilde{N} + sN \quad (7)$$

$$= \sum_{i=1}^n c\eta_i \cdot c\tilde{a}_i + \sum_{j=1}^m s\eta_j \cdot s\tilde{a}_j \quad (8)$$

(d) 断面に作用する軸力と, (7) 式の内部応力の釣合式

$$\frac{AN}{f_c} = \sum_{i=1}^n c\eta_i \cdot c\tilde{a}_i + \sum_{j=1}^m s\eta_j \cdot s\tilde{a}_j \quad (9)$$

この釣合式を満足するまで, 歪を増減して中立軸の位置を変化させる。

(e) 中立軸決定後, 曲げモーメントの計算

中立軸:

$$\tilde{X}\tilde{N} = \frac{1}{(c\xi_n + c\xi_1)} \cdot (c\tilde{y}_1 \cdot c\xi_n + c\tilde{y}_n \cdot c\xi_1) \quad (10)$$

$$XN = \tilde{X}\tilde{N} \cdot D \quad (11)$$

曲げモーメント:

コンクリートの曲げモーメント

$$c\tilde{M} = \sum_{i=1}^n c\eta_i \cdot c\tilde{a}_i \cdot c\tilde{y}_i \cdot f_c \quad (12)$$

鉄筋の曲げモーメント

$$s\tilde{M} = \sum_{j=1}^m s\eta_j \cdot s\tilde{a}_j \cdot s\tilde{y}_j \cdot f_c \quad (13)$$

断面の曲げモーメント

$$\begin{aligned} \tilde{M} &= c\tilde{M} + s\tilde{M} \\ &= \sum_{i=1}^n c\eta_i \cdot c\tilde{a}_i \cdot c\tilde{y}_i \cdot f_c + \sum_{j=1}^m s\eta_j \cdot s\tilde{a}_j \cdot s\tilde{y}_j \cdot f_c \end{aligned} \quad (14)$$

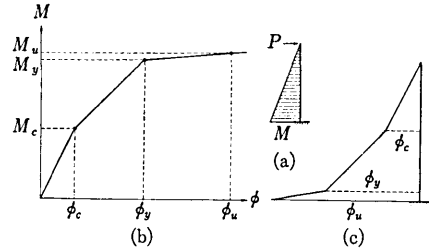


図 7 曲げモーメントと曲率分布

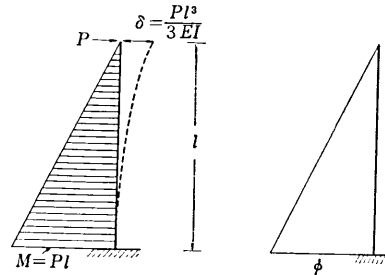


図 8 試験体の耐力と変形

$$M = \tilde{M} \cdot B \cdot D^2 \quad (15)$$

(f) 試験体頂部の荷重と変形の計算

鉄筋コンクリート部材が図 7 (a) のような曲げモーメントの状態である時, 曲げモーメント・曲率関係は, 通常図 7 (b) のようにモデル化され, 材軸に沿った曲率分布は図 7 (c) のようになる。しかし, 本報では図 8 のように試験体の材軸に沿った曲率分布を曲げモーメントと相似形にした三角分布で近似した。

試験体頂部の変形:

$$\delta = \frac{1}{3} \cdot \phi l^2 \quad (16)$$

ただし,  $\phi$  = 試験体脚部の曲率

$l$  = 試験体のスパン

試験体頂部の荷重:

(15) 式のモーメントより

$$P = \frac{M}{l} \quad (17)$$

### 3. 結 果

(1) 入力変位

図 9 (a), 図 9 (b) は試験体に加えた柱頭の変位を示した。応答波の作成方法の詳細は, 文献 2) を参照されたい。

(2) 荷重・時刻・関係

図 10 (a), 図 10 (b) に, 縦軸に試験体頂部の荷重  $P$ , 横軸に時刻をとり実験値と計算値を載せた。時刻は応答計算上の時間を示し, この 15 倍が実験での時刻に対応する。

図 10 (a) の定常波試験では, 繰返し回数の増加によ

定常波試験

応答波試験

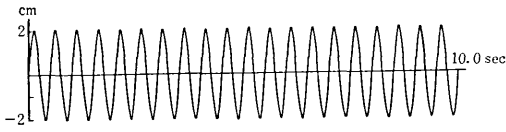


図9 (a) 定常波



図9 (b) 応答波

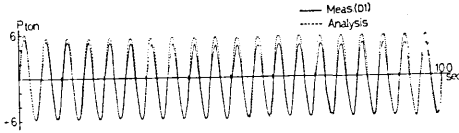


図10(a) 荷重・時刻関係 (実験値と計算値)

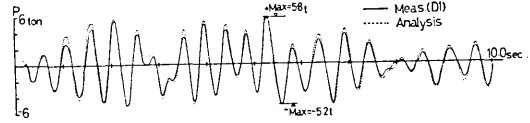


図10(b) 荷重・時刻関係 (実験値と計算値)

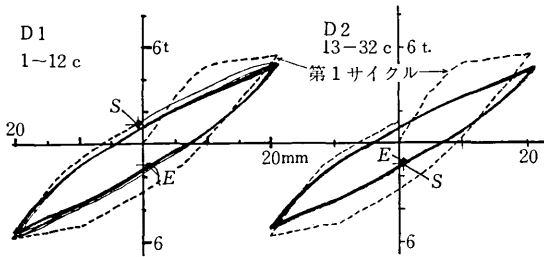


図11 (a) 荷重・変位曲線 (実験値)

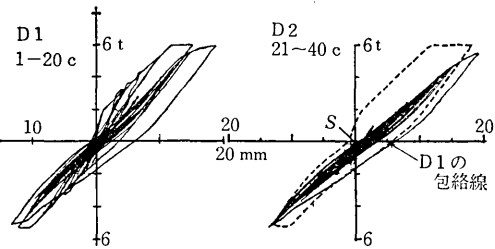


図11 (b) 荷重・変位曲線 (実験値)

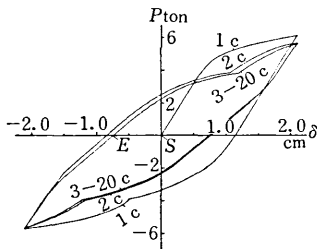


図12 (a) 荷重・変位曲線 (計算値)

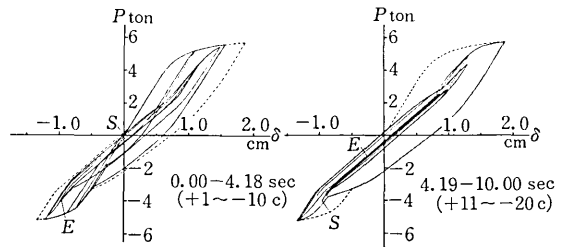


図12 (b) 荷重・変位曲線 (計算値)

る耐力低下が計算では再現されていない。これはコンクリートの応力・歪関係にサイクル疲労の影響が導入されていない事と材軸に沿った曲率分布の仮定のしかたによるものと思われる。

図 10(b) の応答波試験では、定常波の場合より良い一致を示し、特に荷重の最大点以降において良く一致している。

(3) 荷重・変位関係

図 11・図 12 に示した。定常波試験の場合、計算値は実験値に比較的一致した。特に実験で観察された第 1 サイクルと第 2 サイクル以降の復元力特性の形状の相違が計算より説明できた。応答波試験の場合にも計算値はよく実験値を再現している。なお、図 12(b) は 10 秒間の応答波に対する荷重・変位曲線を 4.18 秒を境として前後に分割した表現でありこれらを合わせたものが、図 11 (b) に示した実験値に対応する。ここで、計算値は変位 0 の時の荷重を実験値よりやや高めに評価する傾向

があり、これは図 3 に示した鉄筋の応力・歪関係で本解析に係数  $\alpha=0.5$ ,  $\gamma=11$  と定めた事に多少問題があるものと思われる。

4. ま と め

以上、鉄筋コンクリート造の耐震性を論ずるにあたり鉄筋コンクリート曲げ部材が定常および、非定常変位をうける時の力学的特性を、実験と解析によって比較検討を行なって来た。その結果、本報で行なった鉄筋とコンクリートの非線形応力・歪関係に基づいた断面のモーメント・曲率関係の計算値は、実験値をよく再現していることがわかった。しかし、サイクル疲労、材軸に沿った曲率分布、鉄筋とコンクリートの付着などの評価は、今回解析には取り入れておらず、今後の研究課題にするつもりである。

謝 辞

本研究に際して、本所、田中 尚教授、高梨晃一助教授、臨時事業研究グループの諸先生方、および東大工学部、梅村魁教授、青山博之助教授、前生研技官、伊藤秀夫氏、本学大学院李利銜氏らの御指導、御協力に感謝する次第である。

(1973 年 11 月 27 日 受理)

参 考 文 献

1) 岡田恒男, 関松太郎, 他: 鉄筋コンクリート部材の復元力特性, 生産研究 25 巻 2 号, 1973 年 2 月  
 2) 関松太郎, 岡田恒男, 他: 多数回繰返し応力をうける鉄筋コンクリート部材の復元力(IV), (V), 日本建築学会学術梗概集, S. 47. 10 月

3) 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  
 4) Agrawal, G. L., Tulin, L. G. and Gerstle, K. H.: Response of Doubly Reinforced Concrete Beams to Cyclic Loading, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 62, No. 7, July 1965  
 5) Park, R., Kent, D. C. and Sampson, R. A.: Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, Proceeding of A. S. C. E., ST7, July, 1972  
 6) 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  
 7) Jennings, P. C.: Earthquake Response of a Yielding Structure, Proc. of A. S. C. E., Vol. 90, EM2, August, 1965, p. 41-68  
 8) Jennings, P. C.: Periodic Response of a General Yielding Structure, Proc. of A. S. C. E., Vol. 90, EM2, April, 1964, p. 131~166



次 号 予 告 (3 月 号)

研 究 解 説

地球資源探査衛星写真を用いた首都圏の環境調査..... {村 井 俊 治  
 加 藤 洋 一  
 吉 田 保 博

研 究 速 報

Fe-W-4 wt % Sic 合金の抵抗焼結..... {原 善 四 郎  
 坂 井 徹 郎

応答曲線を用いた機械構造物の各次振動特性の分離法 第 2 報..... 高 橋 伸 晃

DROPWISE CONDENSATION-THE EFFECT OF THE CRITICAL SIZE OF DROP DETACHMENT (I)..... {棚 沢 一 郎  
 落 合 淳 一  
 塩 冶 震 太 郎 外

FATIGUE PROPERTIES OF RESIN CONCRETE UNDER REPEATED COMPRESSION LOADS..... {小 林 一 輔  
 伊 藤 利 治

ON THE CRITICAL SIZE OF DROP DETACHMENT DURING THE PROCESS OF DROPWISE CONDENSATION (I)..... {棚 沢 一 郎  
 落 合 淳 一

円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第 1 報..... {柴 田 碧 潔  
 曾 我 部

炭酸ガスによる軟鋼の酸化..... {本 間 禎 一  
 山 沢 富 雄

多重後方散乱ガンマ線によるカーボン煉瓦厚さの測定 第 3 報..... {佐 藤 乙 丸  
 加 藤 秀 正 雄 夫

研 究 室 紹 介

石田研究室..... 石 田 洋 一