

[2015] 正負交番载荷時のテンションスティフニング効果

正会員○玉井 真一（東京大学大学院）

正会員 島 弘（東京大学大学院）

1. はじめに

交番荷重の作用を受ける鉄筋コンクリート構造物を平面要素の集合体として解析する場合、交番荷重下における平面要素の構成則が明らかにされなければならないが、交番荷重下における鉄筋コンクリートのひびわれ直角方向の剛性に関する研究はきわめて少ない<sup>1)</sup>。本研究は、鉄筋コンクリート一軸部材の交番载荷試験を行い、交番荷重下における鉄筋コンクリートの挙動を観察するとともに、交番荷重下における鉄筋コンクリートのひびわれ直角方向の剛性を評価する方法について検討し、一軸応力下の交番荷重履歴に対応する変形挙動の解析を可能にするものである。

2. 交番载荷試験

2.1 供試体

供試体は図-1に示すようなものであり、圧縮時にねじれが生じるのを防ぐために鉄筋を2本埋め込んだものとした。鉄筋比は、1.0%とした。本実験の目的

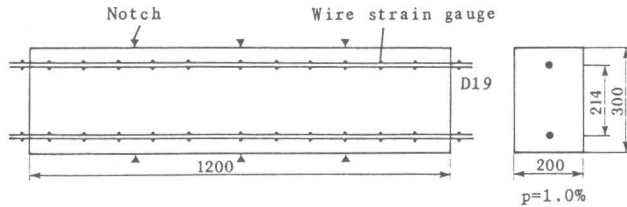


図-1 供試体

的はひびわれ発生後の挙動を観察することであるため、ひびわれの発生位置をノッチによって制御し、鉄筋のひずみ分布が精度良く測定できるようにした。ひびわれ間隔は、一軸引張試験の結果<sup>2)</sup>に基づき、300mmとした。

鉄筋には一軸引張試験<sup>2)</sup>と同じSD30を用いた。降伏強度、引張強度、ひずみ硬化開始ひずみは、それぞれ36.5MPa、51.0MPaおよび1.65%である鉄筋に5mm長のワイヤーストレインゲージを、図-1に示す位置に貼付した。コンクリートは鉄筋軸と直角方向から打設し、脱型後数日間湿布養生し、その後気中養生を行った。試験時におけるコンクリートの圧縮強度は28.6MPaであった。

2.2 実験方法

試験装置を図-2に示す。加力には0.3MNアクチュエータを用いた。図中に示すような載荷板および固定板<sup>3)</sup>を用い、引張力は鉄筋に、圧縮力は鉄筋とコンクリートの双方に作用するようにした。圧縮時に供試体が曲がるのを防ぐために、供試体を両側からローラーにより拘束した。

鉄筋のひずみおよび荷重の測定に加えて、最外側のひびわれ間のコンクリートの中央に設けた測点間の相対変位をステンレス線と変位計を用いて測定することにより、供試体全体の軸方向の平均ひずみを求めた。鉄筋が降伏するまでは、荷重の最大値が±0.1、±0.15、±0.18MNとなるような载荷履歴とした。この引張、圧縮の繰り返しを各荷重段階で3サ

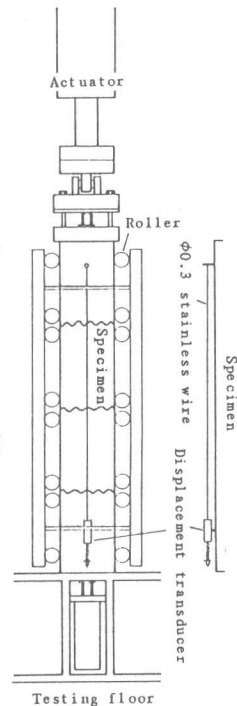


図-2 試験装置

イクル行った。鉄筋降伏後は、平均ひずみが0.9%から、引張、圧縮の繰り返しを3サイクル行った。それ以上の平均ひずみからの圧縮は、供試体に曲がりが生じたために途中で打ち切り、平均ひずみが1.45%と2.25%から各1サイクル行った。

### 3. 交番載荷時における引張剛性のモデル化

#### 3.1 引張剛性の計算方法

実験から得られた荷重-平均ひずみ関係を鉄筋降伏前について図-3に、鉄筋降伏後について図-4に示す。これらの交番載荷時におけるひびわれた鉄筋コンクリート要素の応力-平均ひずみ

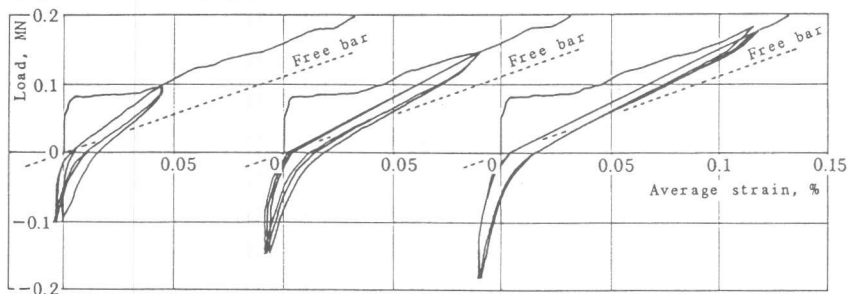


図-3 鉄筋降伏前の荷重-平均ひずみ関係の実験結果

み関係を計算できるようにするのが本研究の目的である。ここで、要素の応力を鉄筋の負担応力とコンクリートの負担応力の重ね合わせにより表現する。これは、鉄筋コンクリート平板においてひびわれと鉄筋軸が直交しない場合、鉄筋は鉄筋軸方向に、コンクリートはひびわれと直角、平行方向に座標軸を取り、それぞれの応力を計算すると便利であるためである。

#### 3.2 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

##### (1) 応力の分割

鉄筋降伏前におけるコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係の実験結果を図-5に示す。この関係は、荷重-平均ひずみ関係から鉄筋の平均応力を引いたものである。この図に示されるように引張力、圧縮力が繰り返し作用する場合のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係は、鉄筋とコンクリートの付着作用およびひびわれの接触が組み合わさり複雑な形状を示す。佐藤ら<sup>1)</sup>は、この平均応力-平均ひずみ関係を直接モデル化することを試みているが、ここでは、コンクリートの平均応力を次式のように分割する。

$$\bar{\sigma}_c = \bar{\sigma}_{cc} + \bar{\sigma}_{cb} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_c$  : コンクリートの平均応力

$\bar{\sigma}_{cc}$  : ひびわれの接触により生じるコンクリートの平均応力

$\bar{\sigma}_{cb}$  : 鉄筋との付着により生じるコンクリートの平均応力

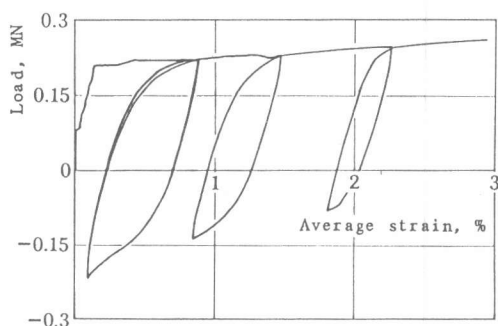


図-4 鉄筋降伏後の荷重-平均ひずみ関係の実験結果

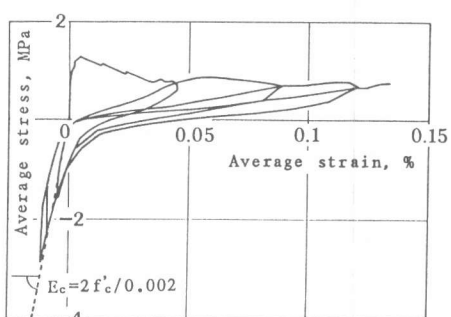


図-5 鉄筋降伏前のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係の実験結果

である。なお、ひびわれの接触による応力を分離することにより、ひびわれ面におけるせん断伝達による圧縮応力の影響を取り入れることも可能である。

それぞれの応力を実験から求める方法を以下に述べる。図-6はひびわれ間の鉄筋の応力分布を模式的に表したものである。影を付した部分は鉄筋との付着によりコンクリートが負担する応力である。これを軸方向に平均したものが付着による平均応力であり、次式によって表される。

$$\bar{\sigma}_{cb} = p (\sigma_{s,cr} - \bar{\sigma}_s) \quad (2)$$

ここで、 $p$  : 鉄筋比 =  $A_s/A_c$

$\sigma_{s,cr}$  : ひびわれの位置における鉄筋の応力

$\bar{\sigma}_s$  : 鉄筋の平均応力

である。ひびわれの接触による応力は、コンクリートの全応力から付着による応力を差し引くことにより求められる。すなわち、

$$\bar{\sigma}_{cc} = \frac{P - A_s \bar{\sigma}_s}{A_c} - \bar{\sigma}_{cb} \quad (3)$$

ここで、 $P$ は荷重である。

これらの応力と平均ひずみとの関係をそれぞれモデル化する必要がある。

(2) ひびわれの接触による応力と平均ひずみの関係

ひびわれの接触による応力と平均ひずみの関係を図-7に示す。この関係は実験結果から以下のようにモデル化できる。引張から圧縮の経路において、

$$\bar{\sigma}_{cc} = E_{cc} (\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_{cc}) \leq 0 \quad (\bar{\epsilon}_{cpc} < \bar{\epsilon}) \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_{cc} = K_c (\bar{\epsilon}) \quad (\bar{\epsilon} \leq \bar{\epsilon}_{cpc}) \quad (5)$$

ここで、 $E_{cc}$  : 再接触時の剛性

$\bar{\epsilon}_{cc}$  : 再接触開始ひずみ

$K_c$  : コンクリートの単調圧縮時における応力-ひずみ関係

$\bar{\epsilon}_{cpc}$  : ひびわれが完全に閉じる時のひずみ、すなわち、式(4)と式(5)が交わるひずみ

である。式(4)で表される応力とひずみの関係は、ひびわれのずれとゆるみ、また、ずれのため接触面積がコンクリートの断面積よりも小さくなり見かけの剛性が小さくなることを考慮したものである。したがって、再接触開始ひずみおよび再接触時の剛性は、ひびわれ面のずれ変形の影響を受けるものである。ひびわれ面のずれがない本実験では、 $\bar{\epsilon}_{cc} = 150 \mu$ 、 $E_{cc} = E_c/3$ となる。ここで、 $E_c$ は前川モデル<sup>4)</sup>の初期剛性であり、 $E_c = 1000f'_c$ とした。

圧縮から引張の経路においては、ひびわれ履歴のないコンクリートの応力-ひずみ関係に従うものとする。

(3) 付着による平均応力と平均ひずみの関係

ひびわれが閉じ始め、ひびわれ位置においてコンクリートが圧縮力を負担するようになると、

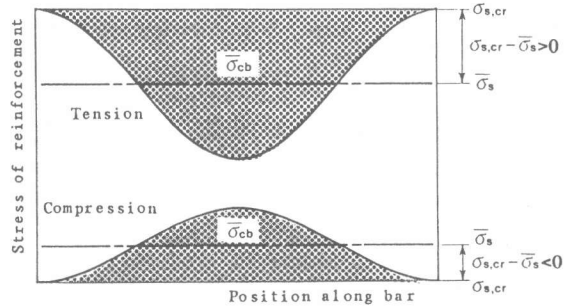


図-6 ひびわれ間の鉄筋の応力分布の模式図

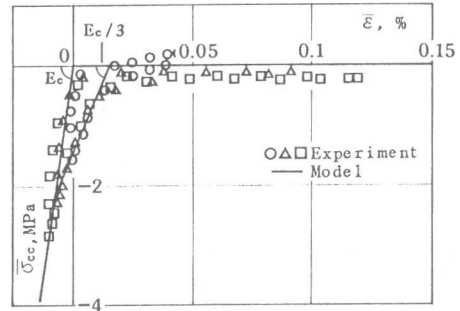


図-7 ひびわれの接触による応力と平均ひずみの関係

コンクリートの圧縮力負担量に対して鉄筋の負担量が小さくなる。したがって、これ以上の圧縮領域では、ひびわれ位置における鉄筋の応力の変化が小さくなり、付着による応力がほとんど変化しなくなると考えられる。この付着による応力の変化が小さくなる点は、ひびわれの接触が始まる点とひびわれが完全に閉じる点との間にある。ここでは、ひびわれが接触を始めてから完全に閉じるまでの接触開始から2/3の位置、すなわち、ひずみが0となる点からの圧縮領域においては、荷重の方向にかかわらず付着による応力は一定となると仮定した。すなわち

$$\bar{\sigma}_{cb} = \bar{\sigma}_{cbo} \quad (\bar{\epsilon} < 0) \quad (6)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_{cbo}$ は平均ひずみが0の時の付着によるコンクリートの応力である。これは、圧縮時にひびわれが接触した後は鉄筋の応力分布形が変化しないと仮定することに等しい。

ひずみが0における付着による応力の大きさは、過去に受けた最大平均ひずみによって表されると考え、実験から求めたこれらの関係を図-8に示す。両者の間には線形関係があり、次式によって表現できる。

$$\bar{\sigma}_{cbo} = -0.0016 E_c \bar{\epsilon}_{max} \quad (7)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}_{max}$ は包絡線上で経験した最大の平均ひずみである。

付着による応力と平均ひずみの関係を図-9に示す。図中に点線で示す実験結果に対し、実線で示すように、この関係を、引張から圧縮への経路を2次曲線、圧縮から引張への経路を直線により表す。すなわち、

$$\bar{\sigma}_{cb} = \frac{\bar{\sigma}_{cbmax} - \bar{\sigma}_{cbo}}{\bar{\epsilon}_{max}^2} \bar{\epsilon}^2 + \bar{\sigma}_{cbo} \quad (\text{引張} \rightarrow \text{圧縮}) \quad (8)$$

$$\bar{\sigma}_{cb} = \bar{\sigma}_{cbo} + \frac{\bar{\sigma}_{cbmax} - \bar{\sigma}_{cbo}}{\bar{\epsilon}_{max}} \bar{\epsilon} \quad (\text{圧縮} \rightarrow \text{引張}) \quad (9)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_{cbmax}$ ：包絡線からの除荷が始まる点における付着による応力である。

引張力作用時の包絡線上においては、ひびわれの接触はないために、単調載荷時のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係のモデル<sup>5)</sup>により付着による応力と平均ひずみの関係を与えることができる。すなわち、

$$\bar{\sigma}_{cb} = f_t \left( \frac{\bar{\epsilon}_{tu}}{\bar{\epsilon}} \right)^c \quad (10)$$

ここで、 $f_t$ ：コンクリートの引張強度

$\bar{\epsilon}_{tu}$ ：ひびわれ発生ひずみ (=0.02%)

$c$ ：鉄筋の付着性状を表す係数 (異形鉄筋に対して  $c=0.4$ )

である。

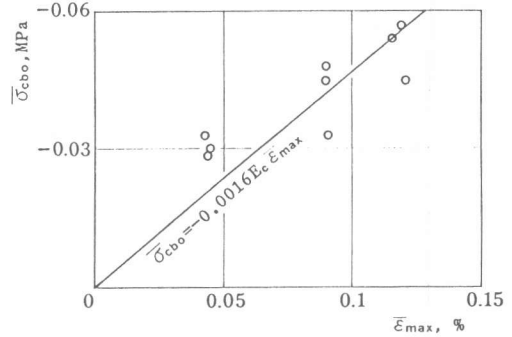


図-8 平均ひずみが0の時の付着による応力と最大平均ひずみの関係

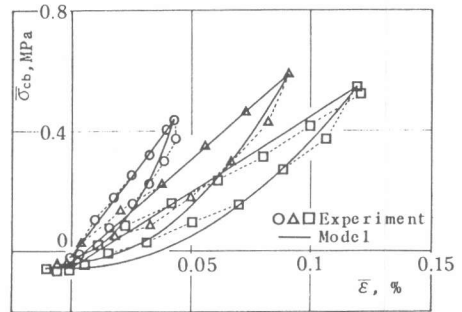


図-9 付着による応力と平均ひずみの関係

### 3.3 鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係

#### (1) 鉄筋降伏前

鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、荷重履歴にかかわらず次式で表される。

$$\bar{\sigma}_s = E_s \bar{\epsilon} \quad (11)$$

ここで、 $E_s$ は鉄筋のヤング係数である。

#### (2) 鉄筋降伏後

鉄筋降伏後における鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を求める手段として、単調載荷時と同様に鉄筋の応力分布を仮定する<sup>2)</sup>。鉄筋の応力分布形が荷重履歴にかかわらず常に正弦曲線で表されると仮定し、次式で表現する。

$$\sigma_s(x) = \bar{\sigma}_s + A \cos(2\pi x / l_{cr}) \quad (12)$$

$$A = \bar{\sigma}_{cb} / p \quad (13)$$

ここで、 $x$ ：鉄筋軸に沿ったひびわれからの距離

$l_{cr}$ ：ひびわれ間隔

である。図-10に降伏後の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を求める手順を示す。与えられた平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ に対して式(6)~(9)から求められるコンクリートの付着による応力 $\bar{\sigma}_{cb}$ を経て式(13)により振幅 $A$ が決定される。平均応力 $\bar{\sigma}_s$ を仮定し、式(12)から鉄筋の応力分布形を決める。この応力分布を鉄筋単体の応力-ひずみ関係を用いてひずみ分布に変換することにより、仮定した平均応力 $\bar{\sigma}_s$ に対応する平均ひずみ $\bar{\epsilon}'$ が計算される。与えられた平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ と計算された平均ひずみ $\bar{\epsilon}'$ が等しくなるように収束計算を行うことにより、真の平均応力が求まる。

この解析においては、鉄筋軸に沿った各点の応力-ひずみ関係の履歴を追跡する必要があり、収束に時間を要する。将来は、鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を加藤モデル<sup>6)</sup>のような簡単な式で表し、実用性の高い方法を開発したいと考えている。

### 4. 荷重-平均ひずみ関係の解析値と実験値との比較

#### 4.1 鉄筋降伏前

コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係と重ね合わせるにより、鉄筋コンクリート要素の荷重-平均ひずみ関係を求めることができる。図-11は、このようにして求めた荷重-平均ひずみ関係の解析結果と実験結果を比較したものである。解析

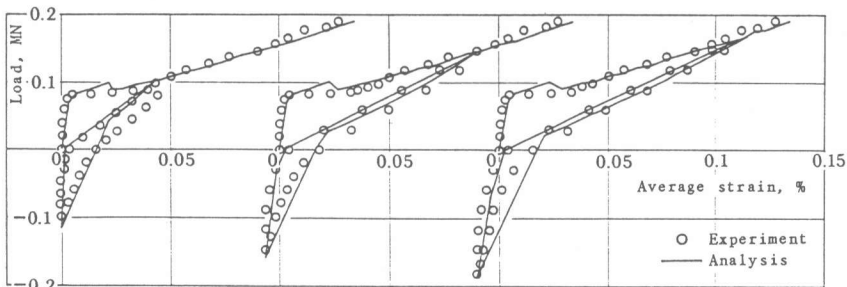


図-11 鉄筋降伏前における荷重-平均ひずみ関係の解析結果と実験結果との比較

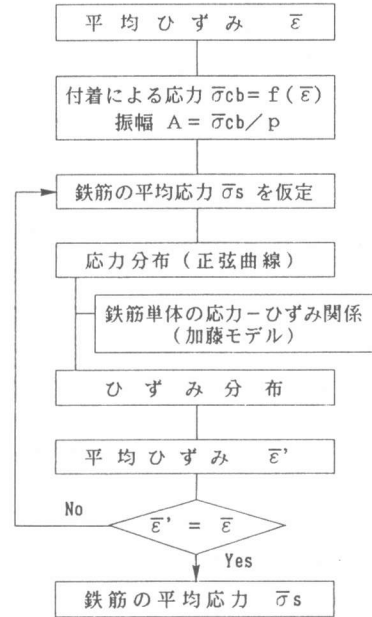


図-10 降伏後の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係の計算手順

結果は各荷重履歴をよく表現している。

#### 4.2 鉄筋降伏後

コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係が、鉄筋降伏後においても降伏前と同じ関数形で表されると仮定すれば、降伏後の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を求めることにより、鉄筋降伏後における鉄筋コンクリート要素の荷重-平均ひずみ関係を求めることができる。

図-12は、鉄筋降伏後の荷重-平均ひずみ関係について解析値と実験値を比較したものである。解析における応力分布からひずみ分布への変換は、ひびわれ間隔の半分を20等分し、各点の応力-ひずみ関係の履歴を加藤モデル<sup>6)</sup>を用いて追跡した。なお、スケルトンカーブをより正確に表すために、ひずみ硬化域の応力-ひずみ関係には次式<sup>7)</sup>を用いた。

$$\sigma = f_y + (1 - e^{-(\varepsilon_{sh} - \varepsilon)/k}) (1.01f_u - f_y) \quad (14)$$

ここで、 $k = 0.032(400/f_y)^{1/3}$ 、 $f_y$ : 降伏強度(MPa)、 $f_u$ : 引張強度(MPa)、 $\varepsilon_{sh}$ : ひずみ硬化開始ひずみである。図-12において、解析値は実験値と良く一致している。

#### 5. まとめ

一軸鉄筋コンクリート要素の交番繰り返し荷重下における剛性に関する実験および解析の結果から、次のような結論を得た。

- 1) コンクリートに発生する応力を、鉄筋との付着により生じるものと、ひびわれの接触により生じるものに分割し、それぞれの応力と平均ひずみとの関係を定式化した。
- 2) 鉄筋との付着によりコンクリートに生じる応力と平均ひずみの関係が与えられているとき、鉄筋の応力分布形を仮定することにより、交番載荷時における降伏後の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を求めることができる。応力分布形は正弦曲線により表すことができる。
- 3) コンクリートと鉄筋のそれぞれの平均応力-平均ひずみ関係を重ね合わせるにより求めた一軸鉄筋コンクリート部材の荷重-平均ひずみ関係の解析値は、実験結果と良く一致した。

謝辞: 本研究をご指導頂いた岡村甫教授に対してここに謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 佐藤, 白井, 加藤: RC耐震壁の履歴特性と非弾性解析 - 解析用付着モデルとその検討 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和55年9月, pp.1803-1804.
- 2) 玉井, 島, 出雲, 岡村: 一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, 1987年2月, pp.239-247.
- 3) Shima, H. et al.: New method for testing rotational capacity of reinforced concrete pier, Proc. of the 41th annual conference of JSCE, Vol.5, Nov.1986, pp.131-132.
- 4) 前川, 岡村: 弾塑性破壊モデルに基づくコンクリートの平面応力構成則, コンクリート工学, Vol.21, No.5, May 1983, pp.87-99.
- 5) 岡村, 前川: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析, 土木学会論文集, No.360/V-3, Aug.1985, pp.1-10.
- 6) Kato, B.: Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic actions, AICAP-CEB Symposium, Rome, May 1979, Bulletin D'Information No.131, CEB, pp.7-27.
- 7) 島, 周, 岡村: 異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性, 土木学会論文集, No.378/V-6, 1987年2月, pp.213-220.

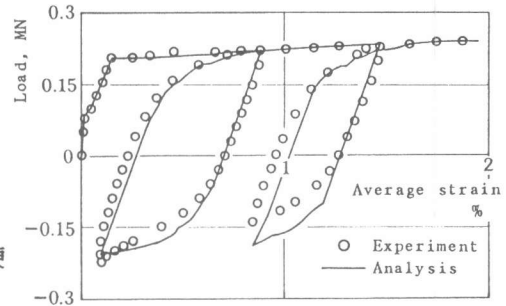


図-12 鉄筋降伏後における荷重-平均ひずみ関係の解析結果と実験結果との比較