

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

AVERAGE STRESS-AVERAGE STRAIN RELATIONSHIP OF STEEL
IN UNIAXIAL TENSION MEMBER IN POST-YIELD RANGE

玉井 真一*・島 弘**・出雲 淳一***・岡村 甫****

By Shinichi TAMAI, Hiroshi SHIMA, Junichi IZUMO and Hajime OKAMURA

Uniaxial tensile tests were conducted on prismatic reinforced concrete specimens. Stress distribution along bar in addition to the total elongation was measured and average stress-average strain relationship of steel in post-yield range was obtained. In the average stress-average strain curve, steel starts to yield below its yield strength and the length of yield plateau is zero.

The average stress-average strain curve can be predicted by assuming a stress distribution of steel. Instead of assuming a bond stress versus slip relationship or the bond stress distribution, the stress distribution was assumed directly. The stress distribution can be simply expressed by sine curve.

Keywords : tension stiffening, post-yield, stress distribution of steel, tension tests

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物では地震時等、大きな外力が作用する場合に鉄筋の降伏を許し、変形によって外力のエネルギーを吸収するという設計思想が採られている。また、鉄筋コンクリート平板の有限要素解析では降伏後の引張剛性が変形に大きく影響を及ぼすことがある¹⁾。したがって、鉄筋降伏後の引張剛性を精度よく評価することは鉄筋コンクリート構造物の終局状態における変形性能を知るうえで重要である。

構造物あるいは部材を構成する鉄筋コンクリート要素を取り上げ、その引張剛性を評価する研究はこれまでに数多く行われている²⁾が、それらはすべて、鉄筋が弾性域にある場合を扱っており、鉄筋降伏後の引張剛性を実験によって調べたものはない。

鉄筋コンクリート要素の引張剛性を評価する方法として、要素を鉄筋とコンクリートに分離し、それぞれの特性を重ね合わせることが行われている。その場合、鉄筋とコンクリートの間には付着作用が存在するため、鉄筋

コンクリート要素を構成する部分としての鉄筋およびコンクリートの特性は、それぞれの単独の特性とは異なるものである。

引張荷重下での鉄筋およびコンクリートの特性は、平均応力と平均ひずみの関係として与えることができる。この平均応力-平均ひずみ関係は一般に、鉄筋軸と主応力方向が一致するような一軸引張試験から求められる。本研究は、一軸引張試験を行って、降伏後における鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を求めようとするものであるが、その場合、次のような問題が生じる。実験中に供試体の外側から得られる情報は、引張荷重と供試体の伸びから求められる平均ひずみである。この平均ひずみは鉄筋の平均ひずみと等しい。鉄筋降伏前であれば、鉄筋の平均応力と平均ひずみは弾性関係にあるため、平均ひずみから平均応力を推定することができる。しかし、鉄筋が降伏を開始すると、降伏前の部分と降伏後の部分が鉄筋軸に沿って混在するため、平均ひずみから平均応力を推定することはできないのである。したがって、平均ひずみとは独立した手段によって鉄筋の平均応力を求める必要がある。

本研究は、平均応力を求めるために鉄筋の応力分布を測定して降伏後における平均応力-平均ひずみ関係を求め、さらに、鉄筋の応力分布をモデル化することにより

* 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科(同上)

*** 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科(同上)

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科(同上)

平均応力-平均ひずみ関係を求める方法を提案するものである。

2. 一軸引張試験

(1) 実験条件

鉄筋コンクリート要素の引張剛性に影響を及ぼすと考えられるコンクリート強度、鉄筋比、鉄筋の降伏強度、養生条件による乾燥収縮の有無を実験条件として選び、これらを組み合わせた6ケースについて実験を行った。供試体と実験条件の対応を表-1に示す。

鉄筋の周囲にあるコンクリートに乾燥収縮が生じると鉄筋がコンクリートを拘束するために、コンクリートに引張応力が生じる。したがって、見掛け上、コンクリートの引張強度が低下し、ひびわれが発生しやすくなると考えられる。供試体No.1は水中養生によって乾燥収縮を防ぎ、乾燥収縮が生じていると考えられる気中養生の供試体No.2と比較するものである。

供試体No.2、No.3はコンクリート強度の違いによる付着性状およびひびわれの発生しやすさの違いの影響を、No.3、No.4は鉄筋比の違いによるひびわれ間隔の影響を調べるためにものである。

鉄筋単体の応力-ひずみ関係が異なれば、平均応力-平均ひずみ関係も異なると考えられる。そこで、供試体No.4、No.5、No.6は応力-ひずみ関係が異なる、すなわち、降伏強度が異なる鉄筋を用いたものである。

(2) 供試体

供試体は図-1に示すようなコンクリート角柱の中心に鉄筋を1本埋め込んだものとした。鉄筋径はD19としコンクリートの断面積を変えて鉄筋比を調節した。

ひびわれが生じた鉄筋コンクリートの平均伸びひずみ

表-1 実験条件

番号	コンクリート 圧縮強度 MPa	鉄筋比 %	鉄筋の 種類	養生 条件	
1	45	1.0	SD50	水中	
2					
3	25	0.6	SD70	気中	
4					
5			SD30		
6					

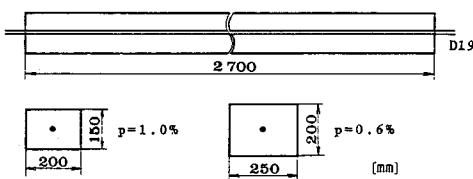


図-1 供試体およびその断面

およびコンクリート中の鉄筋の平均応力を測定する場合、ひびわれを多く含むように、検長を大きくとった方が精度が高い結果が得られる。そこで、ひびわれが多く発生するように供試体は十分長いものとした。

鉄筋の応力を直接測定することはできないため、ひずみを測定し、応力-ひずみ関係を用いて応力を変換する方法を用いた。鉄筋のひずみ分布を測定するために、鉄筋の表裏に10ふし（約100 mm）ごとに、ふしに対する位置関係が一定になるように5 mm長のワイヤーストレインゲージを貼付した。このゲージ間隔は鉄筋の付着性能を妨げないために十分大であり、かつ、ひずみ分布を求めるために十分小であると考えられる。

(3) 使用した鉄筋

本実験ではひずみの測定が重要であるが、通常の異形鉄筋ではストレインゲージを貼付する際にリブを削る必要があり、断面が欠損する。そこで、縦リブがなく鉄筋を削る必要がないねじふし鉄筋を使用した³⁾。

鉄筋の特性を表-2に示す。解析に用いた鉄筋の断面積は、水中重量から求めた体積を長さで除することにより求めた。ひずみ硬化率はひずみが3%以下の範囲における概略値である。鉄筋の応力-ひずみ曲線を図-2に示す。ひずみを応力に変換するために用いる応力-ひずみ関係は、図-2に実線で示すようなトリリニア型とした。

表-2 鉄筋の特性

鉄筋の種類	SD30	SD50	SD70
鉄筋径, mm	19.5	19.5	19.5
ヤング係数, GPa	190	190	190
降伏強度, MPa	350	610	820
ひずみ硬化開始ひずみ, %	1.65	1.40	0.60
ひずみ硬化率, GPa	3.7	5.9	2.8

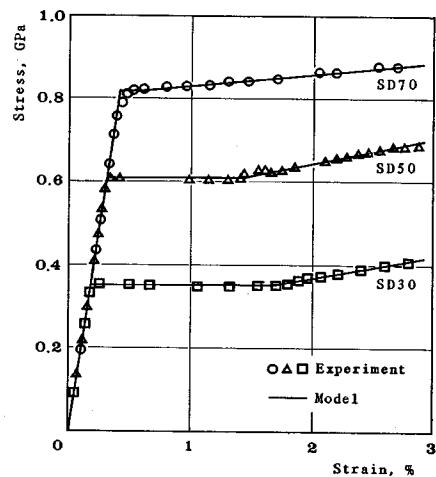


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

(4) 実験方法

鉄筋が角柱の中心に正確に位置するように型枠上面から針金で鉄筋を吊り、鉄筋軸と直角方向からコンクリートを打設した。供試体 No. 1 は乾燥収縮を防ぐために脱型直後から載荷前日まで水中養生し、運搬、載荷時の乾燥を防ぐためにラッカーペイントを表面に塗布した。その他の供試体は湿布養生の後、気中養生とした。

載荷方法は、床上に水平に設置した供試体に引張力を加えるものである。図-3 に示すようなプレストレストコンクリートの載荷枠を製作して、供試体から突出した鉄筋の一端を固定し、他端にセンターホールジャッキによって引張力を加えた。摩擦を断つために供試体と床面の間にはローラーを介した。載荷中は鉄筋のひずみに加えて引張荷重と供試体全長の伸びを測定した。供試体の伸びは、コンクリートの両端面の相対変位からではなくコンクリートの両端部に位置する鉄筋の相対変位から求めた。その測定方法は図-3 に示すように載荷前に、鉄筋に $\phi 0.3$ ステンレス線の端を固着しておき、供試体の

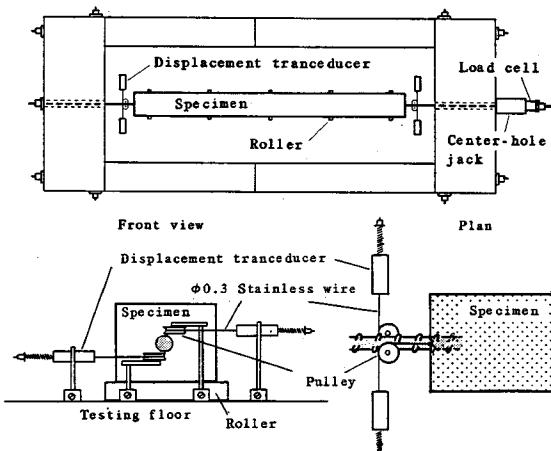


図-3 載荷装置および伸び測定部の詳細

外側に引き出して滑車を介して電気式変位計に接続するものである。なお、滑車および変位計は床上に固定した。変位と鉄筋のひずみの値はそれぞれ鉄筋の表裏の測定値を平均して求めた。

3. 実験結果および考察

(1) 鉄筋の降伏後におけるひずみおよび応力の分布

図-4 に供試体 No. 4 における降伏後の鉄筋のひずみおよび応力分布の一例を示す。

まず、図-2 に示した鉄筋の応力-ひずみ曲線を用いてひずみの測定値から同じ点の応力を求めた。次に、降伏後も鉄筋には付着応力が作用するために、応力が一定である区間は存在せず、応力分布形は滑らかな曲線で表わせると考えて、隣接する 3 測点間を結ぶ 2 次曲線を連ねて応力分布形を表わした。この応力分布形を積分して鉄筋の平均応力を求めた。

応力分布曲線が降伏応力よりも下側にある部分では鉄筋が弾性域に、降伏応力よりも上側にある部分では鉄筋がひずみ硬化域にあり、応力が降伏応力と一致した点ではひずみは降伏ひずみからひずみ硬化開始ひずみまで跳び上がる⁴⁾。ひずみ分布形でひずみが弾性域にある測点とひずみ硬化域にある測定の間は応力分布形に基づいて補間したものである。

(2) 引張荷重、鉄筋の平均応力およびコンクリートの平均応力と、平均ひずみとの関係

図-5 に供試体 No. 1 における引張荷重、鉄筋の平均応力およびコンクリートの平均応力と平均ひずみとの関係を示す。平均ひずみは供試体の伸びから求めたもので、供試体全体、鉄筋およびコンクリートに共通である。中段に示す鉄筋の平均応力に鉄筋の断面積を掛けることによって、引張荷重のうち、鉄筋が負担している部分を求めることができる。上段に示す引張荷重から鉄筋の負担分を差し引き、コンクリートの断面積で除したものが下段に示すコンクリートの平均応力である。

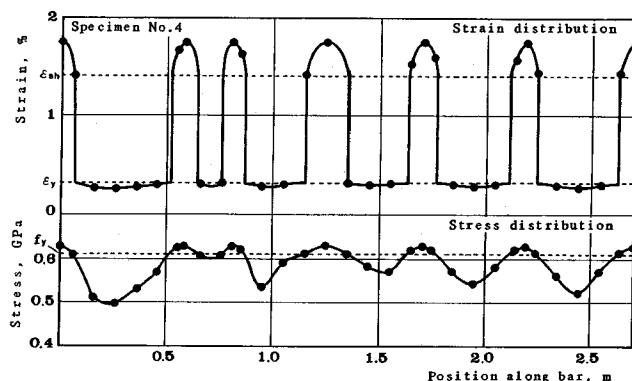


図-4 鉄筋降伏後のひずみおよび応力の分布

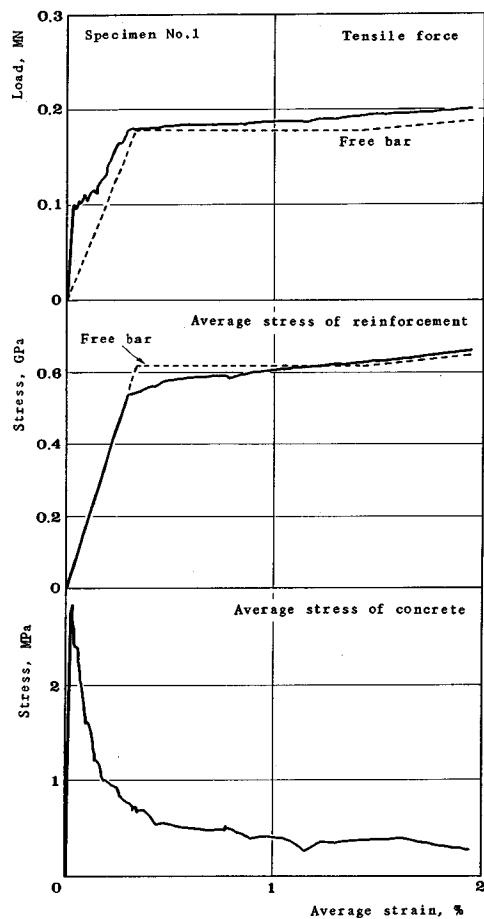


図-5 引張荷重、鉄筋の平均応力、コンクリートの平均応力と平均ひずみとの関係

鉄筋とコンクリートの付着作用のために、ひびわれ発生後もひびわれ間のコンクリートが引張力を負担する Tension Stiffening 効果によって、鉄筋コンクリート要素の引張剛性は鉄筋単体の引張剛性よりも高い。図—5 下段はコンクリートが鉄筋降伏後においても引張力を負担し、Tension Stiffening 効果が存在することを示している。さらに、鉄筋が降伏しても Tension Stiffening 効果が急激に低下する傾向はみられず、平均ひずみが 2% 近くに達してもコンクリート引張強度の約 10% の Tension Stiffening 効果が存在している。したがって、図—5 上段において鉄筋コンクリート要素の引張剛性は鉄筋が弹性域にある範囲のみではなく、降伏後に至っても鉄筋単体の引張剛性より高くなっている。他の供試体の実験結果にも同様な傾向がみられた。

図-5 中段に示した鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線は鉄筋単体の応力-ひずみ曲線とは異なり、次のような特徴をもっている。

- ① 鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線の降伏点は、鉄筋単体の応力-ひずみ曲線の降伏点よりも低い。

- ② 鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線では塑性棚の長さが0であり、降伏後ただちに、鉄筋単体におけるひずみ硬化域のようにひずみの増加に応力の増加が伴う領域となる。

これらの特徴については以下のように説明することができる。

鉄筋コンクリート要素に作用する引張力は鉄筋とコンクリートが分担して負担しているが、ひびわれの位置では鉄筋のみが全引張力を負担している。したがって、ひびわれの位置での鉄筋の応力と鉄筋およびコンクリートの平均応力の関係は次式で表わせる。

ここで、 σ_{cr} :ひびわれの位置での鉄筋の応力

$\bar{\sigma}_s$: 要素内の鉄筋の平均応力

$\bar{\sigma}_c$: 要素内のコンクリートの平均応力

p ：鉄筋比

である。図-6は、式(1)およびひびわれ間の鉄筋の応力分布を模式的に示したものである。ひびわれの位置で鉄筋の応力が降伏応力に達したとき、鉄筋の降伏が始まるが、その時点ではひびわれ間の鉄筋の応力は降伏応力に達していないために平均応力と平均ひずみは鉄筋単体の降伏点よりも低い所にあるのである。鉄筋コンクリート要素の引張剛性を評価する場合に、コンクリートの平均応力-平均ひずみ曲線を鉄筋単体の応力-ひずみ曲線に重ね合わせたのでは、鉄筋の降伏点を実際よりも高く見積もることになることに注意する必要がある。

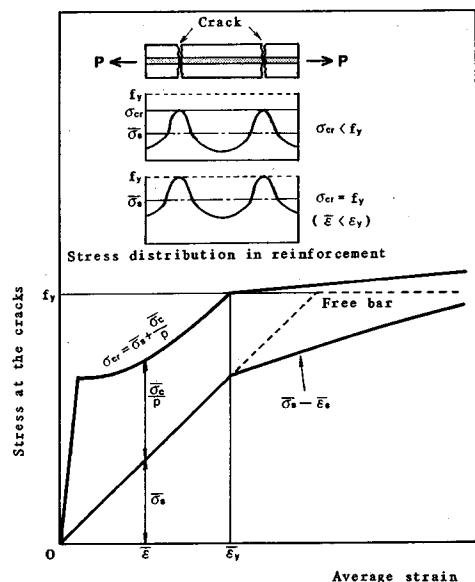


図-6 鉄筋が降伏を開始するときの平均応力、平均ひずみ

式(1)と図-6から、鉄筋比が低いほど、コンクリート強度が高いほど、また鉄筋の降伏点が低いほど鉄筋単体の降伏点に比べて平均応力-平均ひずみ曲線の降伏点は低くなると考えられる。図-7は供試体No.6の平均応力-平均ひずみ関係を示したものである。この供試体は鉄筋比と鉄筋の降伏点がともに低いためにひびわれ発生開始直後に鉄筋が降伏したもので、平均応力-平均ひずみ曲線の降伏点の高さは鉄筋単体の応力-ひずみ曲線の降伏点の高さの2分の1以下である。

ひびわれの位置では鉄筋のみが全引張力を負担しているために鉄筋の降伏はひびわれの位置から始まる。鉄筋とその周囲のコンクリートとの間に相対変位が生じていれば、すなわち、鉄筋がひびわれ面から抜け出していくば、ひびわれの位置に、鉄筋がコンクリートに覆われていない裸の区間が存在することになる。この場合には鉄筋の降伏は鉄筋が裸である区間で同時に始まり、その区間の鉄筋のひずみと区間長の積だけの伸びが鉄筋コンクリート全体に生じる。しかし、異形鉄筋ではふしが存在するために、鉄筋とその周囲のコンクリートとの間には相対変位は生じず、鉄筋の周囲のコンクリートは内部ひびわれが生じることによって鉄筋とともに変形している⁷⁾。したがって鉄筋のひびわれ面からの抜け出しあり、鉄筋に接する面上でのひびわれ幅は0であると考えられる。この場合には、鉄筋が降伏を開始するとき、降伏する部分は長さのない点であり、その部分のひずみが増大しても鉄筋コンクリート全体の伸びに影響を与えることはない。

鉄筋にひずみ硬化域がないと仮定すると、鉄筋が降伏した点では、応力一定の下でひずみがただちに破断ひずみに達し、鉄筋コンクリート全体に伸びを生じることなく鉄筋が破断する。しかし、実際には、鉄筋にひずみ硬化域が存在するために鉄筋が降伏した点のひずみはひずみ硬化開始ひずみでとどまり、以後の引張荷重の増加に抵抗することができる。

図-4に示したように、コンクリート中の鉄筋は降伏

後ただちにひずみ硬化域に入る。これは降伏後も鉄筋に付着応力が作用し、微小区間の鉄筋には必ず応力差が生じる結果、塑性棚が生じる範囲の長さが0であるためである。したがって、鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線においても塑性棚の長さは0である。

ひびわれの位置で鉄筋が降伏し、ひずみ硬化域に入った後、引張力の増加に伴いコンクリート中の鉄筋もしだいに降伏し、ひずみ硬化域に入ってゆく。降伏後の平均応力-平均ひずみ曲線はこの現象を表わしている。また、平均応力-平均ひずみ曲線はひずみが大きくなると鉄筋単体の応力-ひずみ曲線と一致すると考えられる。これは平均ひずみが大きい領域では付着が低下するためにコンクリートによるTension Stiffening効果が低下し、鉄筋が負担する引張力の割合が増すためである。したがって降伏が早いほど平均応力-平均ひずみ曲線の降伏後の勾配は大きくなる。

(3) 応力分布形のモデル化

鉄筋コンクリート要素の引張剛性はコンクリートの平均応力-平均ひずみ曲線を鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線と重ね合わせることによって評価することができる。したがって、鉄筋降伏後の引張剛性を評価するためには降伏後におけるコンクリートおよび鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線を仮定する必要がある。この項では降伏後における鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線を求める方法について述べる。

鉄筋の平均応力は実験で行ったように、鉄筋の応力分布から求めることができる。また、実験では供試体の伸びから平均ひずみを求めたが、鉄筋のひずみ分布からも平均ひずみを求めることができる。したがって、鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は鉄筋の応力およびひずみの分布形を仮定することによって求めることができる。

鉄筋の応力およびひずみの分布形を求めるためには、付着応力-すべり関係から出発する計算によって求める方法⁵⁾、付着応力の分布形を仮定し、それを積分して求める方法⁶⁾、分布形を直接仮定する方法の3通りが考えられる。これらのうち、付着応力-すべり関係は本来、コンクリート中のすべての位置に普遍的なものである。しかし付着応力の値はひびわれの位置では0であり、ひびわれ近傍の付着特性は普遍的な付着応力-すべり関係のみでは表わせない。また、鉄筋が降伏するような高応力の下ではひびわれ近傍で、鉄筋軸に沿った縦ひびわれによる付着劣化が生じる⁷⁾。ひびわれ近傍の取扱いには、場所によって異なる付着応力-すべり関係⁸⁾を用いる方法⁵⁾や付着応力-すべり関係に係数を乗じる方法³⁾が提案されているが、そのような仮定を置くならばマクロに分布形を仮定する方が鉄筋コンクリート要素としての引張剛性を評価する場合には実際的である。また、付着応力

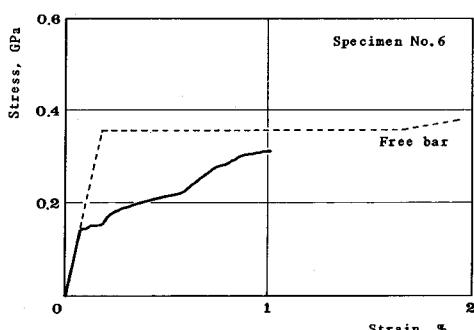


図-7 鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線（降伏が非常に早い例）

の分布形は、鉄筋が弾性域にある場合は連続した滑らかな曲線で表わせるが、降伏後は付着応力が急に低下する⁴⁾ため分布形を簡単な式で表わすことは困難である。したがって応力およびひずみの分布形を直接仮定することにする。

応力およびひずみの分布形は鉄筋単体の応力-ひずみ関係を用いて互いに変換することができるのでどちらか一方を仮定すればよい（コンクリート中の鉄筋では、降伏応力に対応するひずみは降伏ひずみまたはひずみ硬化開始ひずみであり、ひずみがそれの中間にあることはない⁴⁾。したがって、鉄筋単体の応力-ひずみ関係が塑性棚をもつ場合でも、応力とひずみには一対一の対応がある）。その場合、分布形が簡単な式で表現できる方を仮定するのが解析上便利である。図-4に示した鉄筋降伏後のひずみおよび応力分布から、降伏後であっても応力の分布形は連続した滑らかな曲線で表わすことができると考えられる。そこで、本研究では応力の分布形を仮定することを提案する。

図-4のひずみ分布から、平均ひずみに対してはひずみ硬化域にある部分が支配的であることがわかる。したがって、応力分布形を仮定した場合に、それを変換したひずみ分布形から得られる平均ひずみが正しい値であるためには、応力分布形が、鉄筋がどこまで降伏しているかを正しく示さなければならない。応力の分布形を仮定する場合、鉄筋がひずみ硬化域にある部分はひびわれの位置から応力分布曲線と降伏応力との交点までの部分である。したがって、応力の分布形は降伏応力との交点の位置を正しく表わしていかなければならない。

実験で観察されるひびわれ間隔は供試体の中で一定ではなく、各ひびわれ間で応力の分布も異なっている。しかし、応力の分布形は平均応力および平均ひずみを求めるために用いるのであるから、仮定する分布形は個々のひびわれ間の分布形を忠実に表わすものではなく、各ひびわれ間の平均的な分布形でよい。

ひびわれの位置および隣接するひびわれ間の中央で付着応力の値が0であることと付着応力は応力分布形の微分であることを考えると、応力分布形はひびわれの位置とひびわれ間の中央での接線の傾きが0であるような曲線でなければならない。この条件を満たす曲線として、式の表現が簡単であるという理由から正弦曲線を選び、各供試体の応力分布の実測値と比較したものが図-8から図-10である。実測値は鉄筋の降伏開始前後（供試体No.6は降伏開始後のみ）の荷重段階における供試体内の各ひびわれ間の分布形を平均して表わしたものであり、横軸方向の長さは平均ひびわれ間隔の2分の1を表わしている。図に示した荷重段階ではひびわれ間隔は安定しており、以後新たなひびわれの発生はなかった。ま

た、正弦曲線は最大応力と平均応力を実測値と合わせたものである。

図-8は鉄筋の降伏点が異なる場合、図-9はコンクリート強度と鉄筋比が異なる場合、図-10は養生条件が異なる場合である。これらの図から本実験の範囲内では鉄筋およびコンクリートの強度が異なっても、また、乾燥および鉄筋比の影響により、ひびわれ間隔が異なっても応力分布形を正弦曲線で表わすことができると考えられる。このことは、応力分布形を仮定する際にひびわれ間隔やひびわれ幅に関する情報が不要であることを意味し、ひびわれを含む鉄筋コンクリートを連続体として取り扱ううえで好都合である。

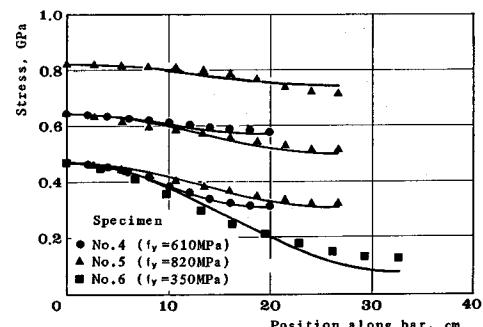


図-8 鉄筋の応力分布と正弦曲線の比較（降伏点の影響）

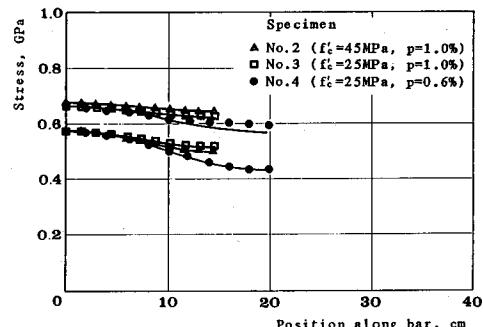


図-9 鉄筋の応力分布と正弦曲線の比較（コンクリート強度、鉄筋比の影響）

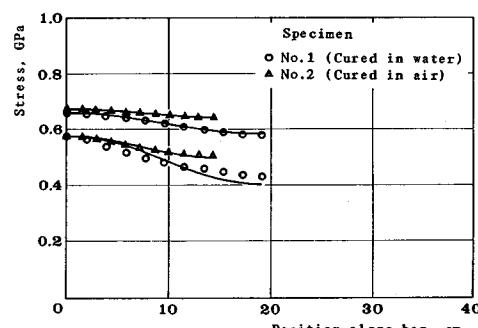


図-10 鉄筋の応力分布と正弦曲線の比較（乾燥収縮の影響）

(4) 正弦曲線の適用範囲

正弦曲線によって応力分布形を仮定する場合、平均応力の値は常に最大応力と最小応力の中央にある。したがって、平均応力が最大応力の2分の1以下である場合の応力分布形を正弦曲線によって仮定すると最小応力の値が負、すなわち圧縮になる。引張荷重の作用下で鉄筋に圧縮応力が発生することは実際には起こり得ないため、正弦曲線による応力分布形の仮定には制限がある。

鉄筋降伏後の応力分布形が正弦曲線では表わせない場合の応力分布形を模式的に示すと図-11のようになる。これは鉄筋降伏開始時において、ひびわれが十分に発生していないためにひびわれ間隔が大きい場合であって、ひびわれの発生が始まった後、たちに鉄筋が降伏する場合である。ひびわれの発生荷重は $A_c f_t$ 、鉄筋の降伏荷重は $A_s f_y$ で表わせるから、これらの比である $p \cdot f_y / f_t$ の値が1に非常に近い場合に、応力分布形が正弦曲線では表わせない状態が生じるものと思われる。

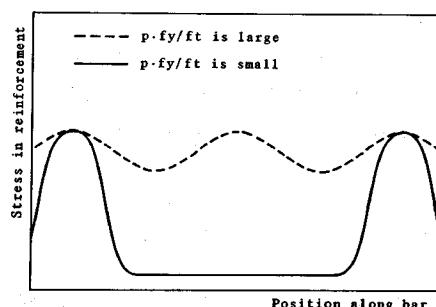


図-11 ひびわれ発生開始直後に鉄筋が降伏する場合の応力分布形

表-3 各供試体の $p f_y / f_t$ の値およびひびわれ発生数

供試体	1	2	3	4	5	6
鉄筋比 p , %	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6
鉄筋降伏強度 f_y , MPa	610	610	610	610	820	350
コンクリート引張強度 f_t , MPa	2.89	1.06	0.84	1.02	1.66	1.64
$p \cdot f_y / f_t$	2.1	5.8	7.3	3.6	3.0	1.3
ひびわれ発生数	降伏前	5	8	7	5	4
	降伏後	0	0	0	0	1
平均ひびわれ間隔, mm	384	287	292	399	533	650

*供試体両端を除く、鉄筋降伏後の値

表-3に実験における各供試体の $p \cdot f_y / f_t$ の値およびひびわれ発生数、平均ひびわれ間隔を示す。ここで、コンクリートの引張強度は最初のひびわれが発生する直前のコンクリートの平均応力の値とした。

4. 鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係の求め方

前章で提案した応力分布形のモデル化によって、鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係および鉄筋コンクリート一軸引張部材の荷重-平均ひずみ関係を求める方法は以下の手順に従う。

(1) 降伏の判定

① コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を表わすモデルを定める。ただし、モデルは鉄筋降伏以後にも Tension Stiffening 効果を考慮しているものでなければならない。

② 弾性域での鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係、 $\bar{\sigma}_s = E_s \bar{\epsilon}$ と①のコンクリートのモデルを重ね合わせて、弾性域での荷重-平均ひずみ関係を得る。

③ 荷重が鉄筋単体の降伏荷重、 $A_s f_y$ と一致したと

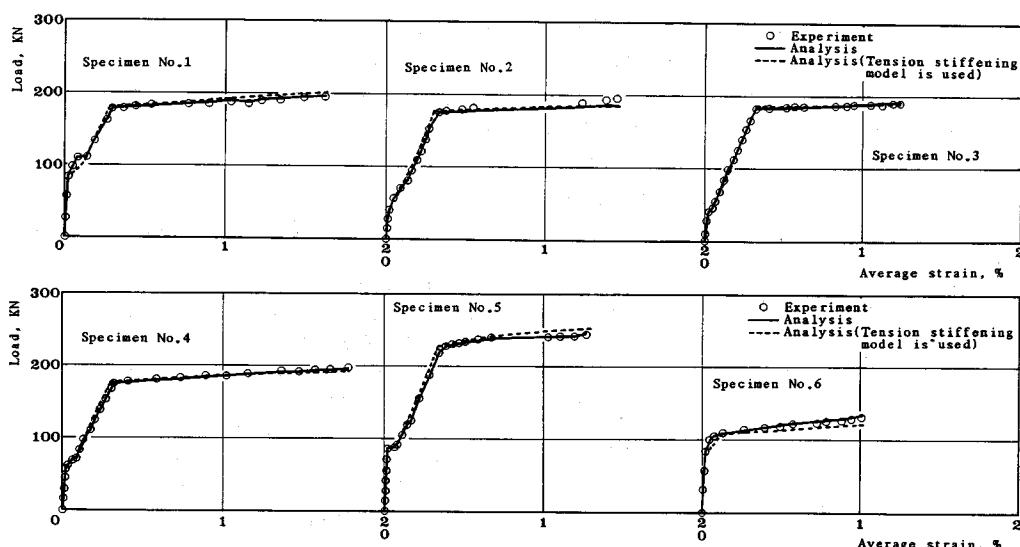


図-12 正弦曲線を用いて求めた降伏後の荷重-平均ひずみ曲線と実測値の比較

き、鉄筋は降伏を開始する。

(2) 降伏以後

④ ある平均ひずみを設定するとコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係からコンクリートの平均応力が定まる。

⑤ 式(1)から鉄筋の最大応力と平均応力の関係が定まるが、最大応力と平均応力の差は応力分布形の振幅を表わしている。

⑥ 鉄筋の平均応力を仮定すれば応力分布形が定まる。これを鉄筋単体の応力ひずみ関係によってひずみ分布形に変換し、平均ひずみを求める。

⑦ ⑥で得られた平均ひずみの値を④で設定した平均ひずみの値と比較し、収束計算を行う。

⑧ 得られた鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係と仮定したコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を重ね合わせて荷重-ひずみ曲線を得る。

図-12は以上の手順に従って求めた各供試体に対応する荷重-平均ひずみ曲線である。鉄筋の応力分布形には正弦曲線を、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係には図-5下段に示したような実測値、または、次式で表わされるモデル¹⁾を用いた。

ここで、 ε_{tu} はひびわれ発生ひずみ、 c は鉄筋の付着性状を表わすパラメーターであって、モデルが実測値とほぼ一致するようにそれぞれ 0.02%, 0.4 とした。また、コンクリートの引張強度には実測値を用いた。これはコンクリートの引張強度がひびわれ発生荷重はもちろん、ひびわれ発生後の挙動にも大きく影響を与えるためである。さらに、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係は鉄筋降伏後も同じ式で表わせるものと仮定した。

コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係として実測値を用いた場合の荷重-平均ひずみ曲線を実測値と比較することによって、正弦曲線による応力分布形モデルの精度を評価することができる。図-12において計算値と実測値はよく一致しており、コンクリートの平均応力の値が正しい場合には、正弦曲線によるモデル化が妥当であることを示している。また、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係として式(2)のモデルを用いた場合の荷重-平均ひずみ曲線の計算値は実測値の傾向をよく表わしているといえるが、若干、実測値との乖離がみられる場合もあり、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係のモデルの精度が鉄筋降伏後の引張剛性の評価に影響を与えることを示している。したがって、鉄筋降伏後の引張剛性を正しく予測するためには、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係として精度のよいモデルを用いることが必要である。

供試体 No. 6 では、図-7 に示したように鉄筋の平均

応力が降伏応力の2分の1以下で降伏が始まったため、鉄筋降伏開始直後に、応力分布形を正弦曲線で表わした場合の最小応力が負になった。対策として、正弦曲線のうち応力が負である区間を除いて、応力が正である区間の平均応力を求め、この値を鉄筋の平均応力とした。平均ひずみに関しては応力分布形のうち、ひずみ硬化域にある区間が支配的であるため、弾性域にある区間を修正しても平均ひずみには影響を与えないといえる。

5. 結論

鉄筋降伏後の一軸引張部材の引張剛性および部材中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係について調査、検討し、以下のような結論を得た。

(1) 鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線の降伏点は、
 鉄筋単体の応力-ひずみ曲線の降伏点よりも低い。特に、
 鉄筋比が低い場合、あるいは、鉄筋の降伏点が低い場合
 には、ひびわれの発生開始直後に鉄筋が降伏し、平均応
 力が鉄筋単体の降伏応力の2分の1に達する前に降伏が
 始まることがある。

(2) 鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線では塑性棚の長さが0であり、降伏後ただちに、鉄筋単体におけるひずみ硬化域のようにひずみの増加に応力の増加が伴う領域となる。

(3) 鉄筋降伏後もひびわれ間のコンクリートは引張力を負担し、鉄筋コンクリート要素は鉄筋単体よりも高い引張剛性をもつ。

(4) 鉄筋降伏後における引張荷重と変形の関係は鉄筋の応力分布形とコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を仮定することによって求めることができる。鉄筋の応力分布形はひびわれ間隔やひびわれ幅にかかわらず正弦曲線によって表わすことができる。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（一般研究A 61420035）を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- 1) 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, pp. 1~10, Aug. 1985.
 - 2) 森田・藤井：有限要素解析における付着モデルの現状と今後の課題，RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集，JCI, pp. 35~42, Dec. 1984.
 - 3) 島・周・岡村：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，No. 378/V-6, pp. 165~174, Feb. 1987.
 - 4) 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, pp. 213~220, Feb. 1987.
 - 5) Tassios, T. P. and Yannopoulos, P. J. : Analytical

- Studies on Reinforced Concrete Members under Cyclic Loading Based on Bond Stress-Slip Relationships, ACI Journal, pp. 206~216, May-June, 1981.
- 6) Somayaji, S. and Shah, S. P. : Bond Stress Versus Slip Relationship and Cracking Response of Tension Members, ACI Journal, pp. 217~225, May-June 1981.
- 7) 後藤・大塚：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 294 号, pp. 85~100, 1984 年 2 月.
- 8) Nilson, A. H. : Internal Measurement of Bond Slip, ACI Journal, pp. 439~441, July 1972.
- 9) 林・黒正・吉田：引抜き力を受ける異形鉄筋の引抜き端近傍における付着性状, RC 構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集, JCI, pp. 43~48, Dec. 1984.

(1986.7.11・受付)