

鉄筋降伏後の引張剛性

2018年8月 岡村 甫 記

鉄筋コンクリートにひびわれが発生すると、ひびわれ面ではコンクリートは直ちに引張負担能力を失い、全引張力が鉄筋によって負担される。ひびわれ面以外では、コンクリートと鉄筋との間には付着が存在するために、鉄筋からコンクリートへと引張力が伝達され、コンクリートも引張力の一部を負担する。鉄筋コンクリートの引張剛性が、ひびわれ発生後も、鉄筋単体の剛性より高いのである。

これを表現する方法には、鉄筋の引張剛性を修正する方法とひびわれ発生後もコンクリートに引張応力を負担させる方法とがある。

前者の方法は、ひびわれと鉄筋との角度が変化しても剛性が変化しないので、2次元問題には適用しがたい。そして、後者には以下の3方法があるが、ひびわれの間隔、鉄筋の方向、鉄筋比などに関係のない(iii)の方法を用いるのが便利である。

- (i) 鉄筋とコンクリートとの間の付着—すべり関係に基づく方法
- (ii) 鉄筋の最大ひずみと平均ひずみとの関係をモデル化する方法
- (iii) コンクリートの平均応力—平均ひずみ関係をモデル化する方法

ひびわれ面での鉄筋応力が降伏点に達するまでは、鉄筋の平均応力と平均ひずみとの関係は、鉄筋単体としての応力—ひずみ関係と一致する。したがって、コンクリートの平均応力と平均ひずみとの関係が定式化されていれば、鉄筋コンクリートに作用する引張力と平均ひずみとの関係が求まることになる。

鉄筋コンクリート板要素に適用するに当たって、Vecchio & Collins<1>は、実験に用いた溶接金網に対してのモデル化を行った。この考えを参考に、一般の異形鉄筋への適用をも考慮して、岡村甫等<2>は以下の方法を提案した。

$$\begin{aligned} S &= E & (0 < E < 1) \\ &= 1 & (1 < E < 2) \\ &= (2/E)^c & (2 < E) \end{aligned}$$

ここに、

$$S: \text{等価応力} = \sigma_c / f_t$$

$$E: \text{等価ひずみ} = \varepsilon_c / \varepsilon_u$$

c: 鉄筋の付着特性を表す係数

= 0.4 : 一般の異形鉄筋の場合

= 0.2 : Vecchio & Collins の Plate Element に用いた溶接金網の場合

ε_u : ひびわれ発生時のひずみ

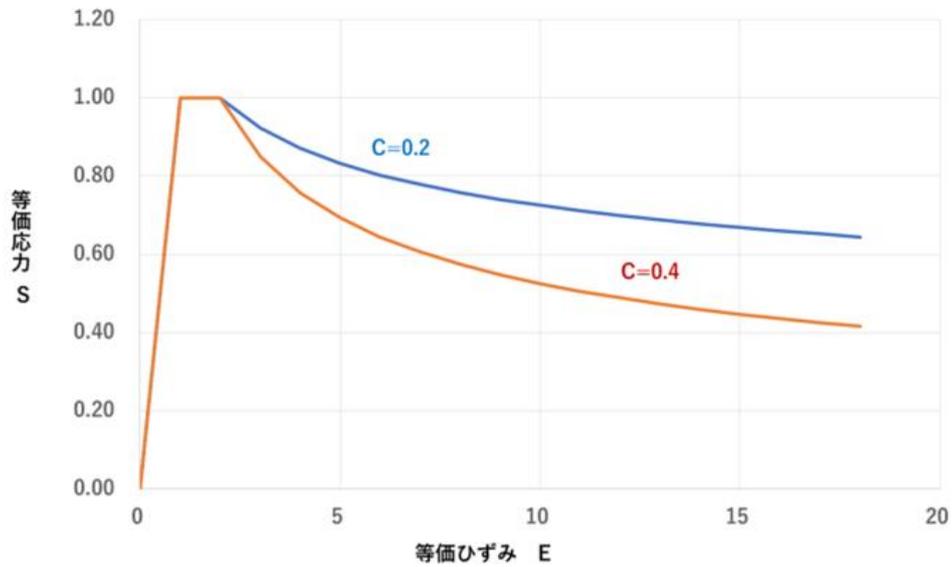


図1:コンクリートの平均応力・平均ひずみの関係<2>

鉄筋が降伏すると、鉄筋の平均応力—平均ひずみ関係は弾性的でなくなり、その関係を簡単には求めることができない。その関係を、鉄筋降伏以降まで定式化したのは、私の知る限り、玉井真一・島弘<3>の研究が初めてである。この論文は実験的研究によって新しい考えが創出される分かりやすい例でもあるので、島弘博士が保持していたデータを活用し、この論文を参照しながら、以下の整理を行った。

1. 実験の概要

供試体は表1に示す6体である。

表1:実験の概要

番号	鉄筋の性質					コンクリートの性質			鉄筋比
	直径 mm	ヤング 係数 Gpa	降伏 強度 MPa	ひずみ 硬化率 Gpa	硬化開始 ひずみ %	断面積 mm ²	引張 強度 MPa	養生	
1	19.1	190	610	5.9	1.40	30,000	2.89	水中	0.96
2							1.06		
3							0.84		
4			50,000	1.02	気中	0.58			
5				1.66					
6				1.64					

断面中心に D19鉄筋1本を配置した長さ 2,700 mm の鉄筋コンクリート供試体の鉄筋両端に引張力を加えるのであるが、鉄筋の上下面に、長さ方向96mm間隔に貼ったひずみゲージによって、鉄筋ひずみを測定する。ひずみゲージを貼ることによる影響を最小限とするために、縦リブがなくふしの精度が良い「ねじふし鉄筋」を使用している。なお、供試体全体の伸びを電気式変位計でも測定している。なお、ひずみゲージは、ふしでも谷でもない山と谷の間に貼っている。

実験は図2に一例を示すように、载荷と除荷を繰り返しながら、徐々に引張力を加えている。縦軸に引張荷重を鉄筋断面積で除した値(MPa)であり、横軸は電気式変位計で求めた供試体の伸びをひずみ(μ)に換算した値である。

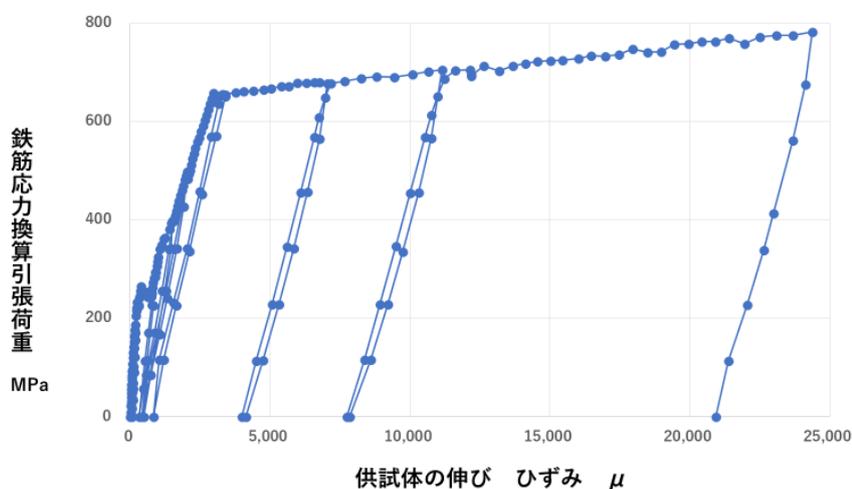


図2: 载荷方法

2. ひびわれの発生

ひびわれ発生時の荷重と鉄筋の平均ひずみとの関係の一例を図3に示す。縦軸は引張荷重を鉄筋断面積で除した値(MPa)であり、横軸は鉄筋ひずみの測定値から求めた平均ひずみ(μ)である。ひびわれが発生すると、鉄筋の平均ひずみが急増し、それに伴って引張力が幾分減少する様子が示されている。次々とひびわれが発生しているが、その間の荷重の上昇は10%程度に過ぎない。

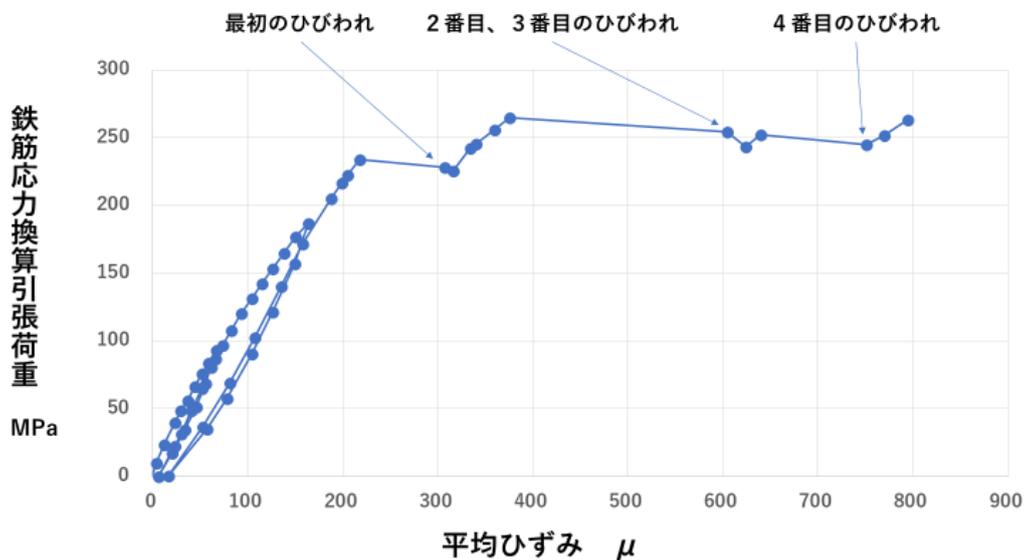


図3:ひびわれの発生時における荷重とひずみとの関係

この例において、最初のひびわれが発生した直後における軸方向鉄筋のひずみ測定値を図4に示す。引張力が加力端部より徐々に内部に伝わり、最初のひびわれが発生した状況が示されている。

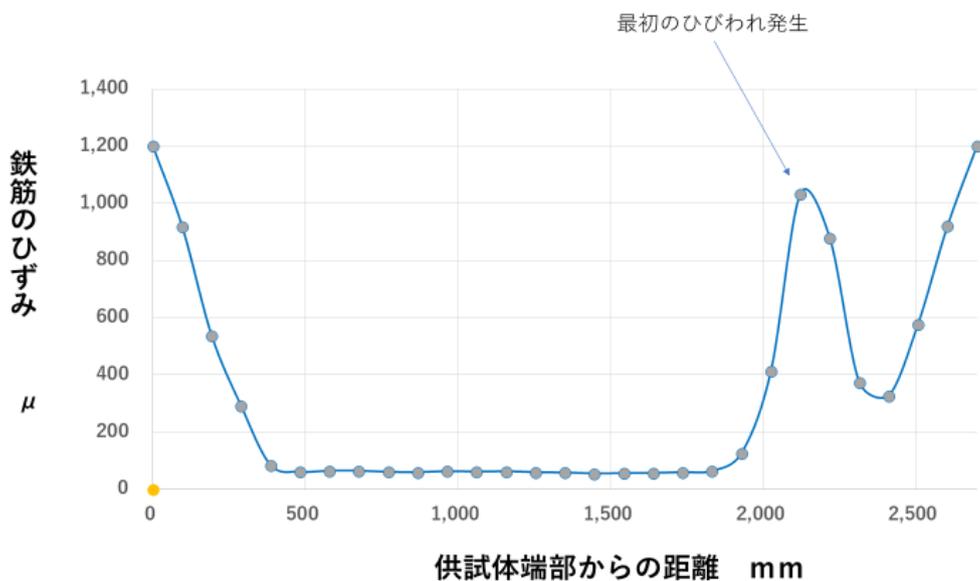


図4:最初のひびわれ発生時における鉄筋のひずみ分布

2本のひびわれが同時に発生した直後および4番目のひびわれが発生した直後の

鉄筋ひずみの分布を図5に示す。この例では、最初のひびわれ発生直後の鉄筋ひずみは $1,030\mu$ である。4番目のひびわれが発生した直後における鉄筋ひずみは、いずれのひびわれ位置においても $1,200\mu$ 程度でほぼ等しい値であった。

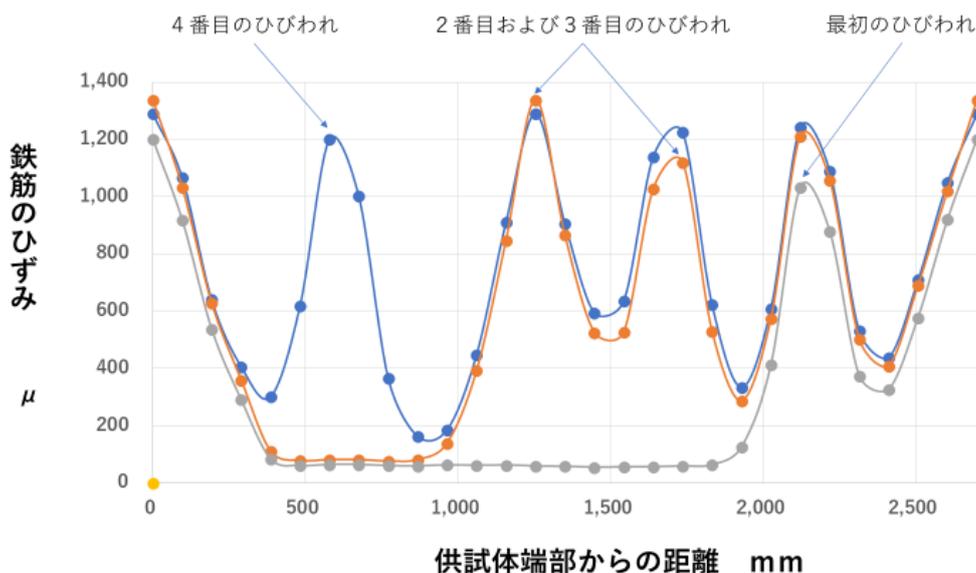


図5:ひびわれ発生時の鉄筋ひずみ分布

以上に述べたように、ほぼ同時期にひびわれが次々と発生し、それ以後のひびわれ発生は多くとも1本であり、ひびわれた鉄筋コンクリートとしての性状を示すようになる。例外は供試体 No.6 である。この供試体に用いた鉄筋は降伏強度が 350MPa と小さく、ひびわれ発生後、直ちに鉄筋が降伏し、鉄筋コンクリートとしての引張特性を示していない。そこで、以下の分析から No.6 供試体を除外することとした。

3. 鉄筋降伏後のひずみ

縦軸に測定した鉄筋のひずみをと、横軸にひずみ測定位置をとって、両者の関係を表した例を図6に示す。各測定位置におけるひずみを鉄筋の応力ひずみ関係を利用して、鉄筋の応力に換算した値を右図に示す。供試体の両端の測定値を除くと、コンクリート内部にある測定点は合計27点である。

降伏ひずみに達していないのは6点、降伏ひずみを超えているのは21点である。驚いたことには、その内11点がひずみ硬化開始ひずみ $14,000\mu$ 以下である。すなわち、コンクリート中の鉄筋では塑性棚があるようには見えないのである。

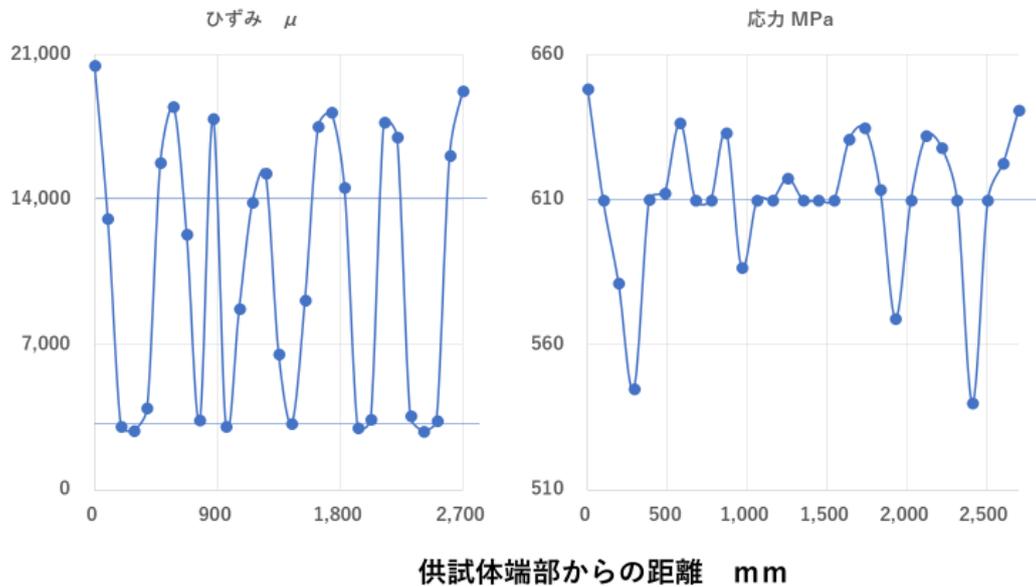


図6:降伏後における鉄筋のひずみ分布と応力分布

この現象を確かめるため、図6における左端のひびわれ近くの3点(左端より482, 579 および 675mm)について、縦軸にひずみをと、横軸に引張荷重を鉄筋応力に換算した値をとって、両者の関係を図7に示した。なお、使用した鉄筋はひずみ硬化開始は14,000 μ である。上下に貼った2枚のゲージの平均であり、鉄筋に一樣な引張力が作用していないためであることも否定できない。そこで、個々のゲージの測定値を調べた結果、右図に示すように、それぞれのひずみゲージの値も同様な傾向を示した。すなわち、コンクリート中の鉄筋は、必ずしも降伏棚を示さないことが確かめられたのである。

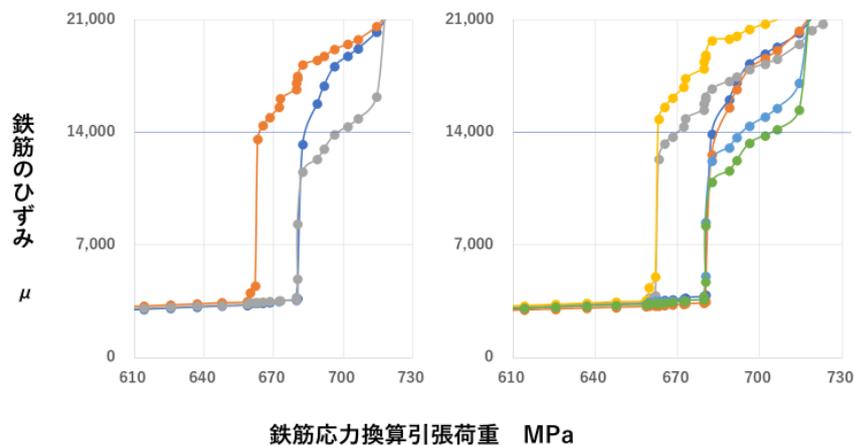


図7:降伏後における鉄筋のひずみ

4. 鉄筋の平均ひずみ

鉄筋のひずみを軸方向に積分し、軸方向の埋め込み長さで除すると、鉄筋の平均ひずみの実測値を求めることができる。その際に生ずる問題は、ひずみの測定位置がひびわれの位置と必ずしも一致していないので、実測値は、実際の値よりも小さくなることである。そこで、ひびわれ位置でのひずみが供試体端部のひずみと一致すると仮定し、ひびわれ近傍の最も大きいひずみをひびわれ位置のひずみと同じ値となるように修正したものと比較した。全供試体の包絡線について修正前と修正後の平均ひずみについて比較した結果、**図8**に示すように、大局的にみればその差は小さい。しかし、拡大した右図に示すように、平均ひずみが 4,000 μ を超え、8,000 μ までは有意な相違が存在する。

相違が大きいのは、鉄筋降伏後であるので、鉄筋の平均応力には、**図9**に示すように、両者の相違は無視できる大きさである。一部のデータの影響が大きくなる処理をしない方がよいと判断し、ひびわれ位置とひずみ測定位置とが一致しないことを無視することにした。

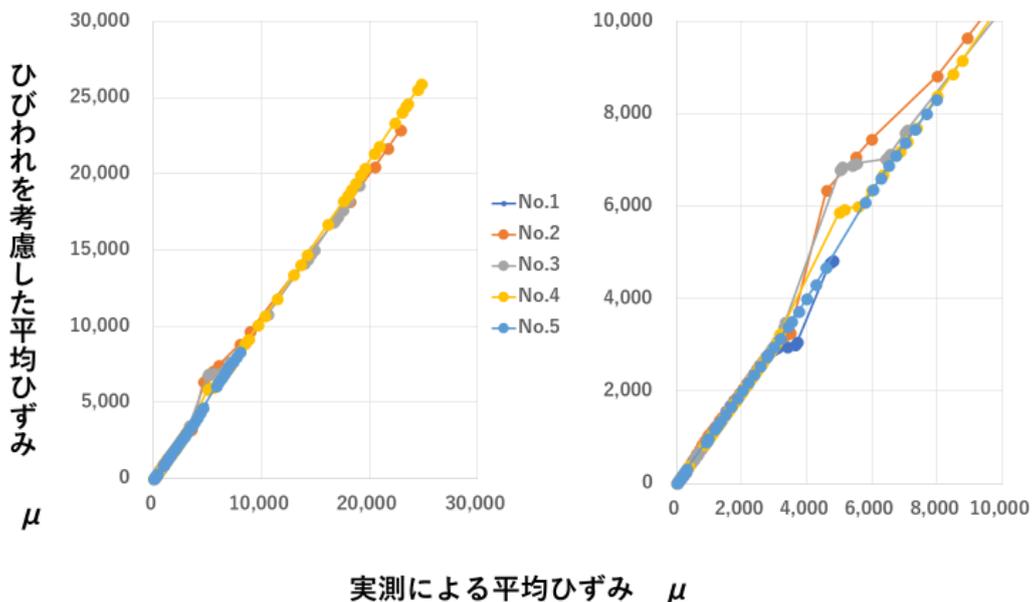


図8:ひびわれ位置の影響を考慮する場合の平均ひずみへの影響

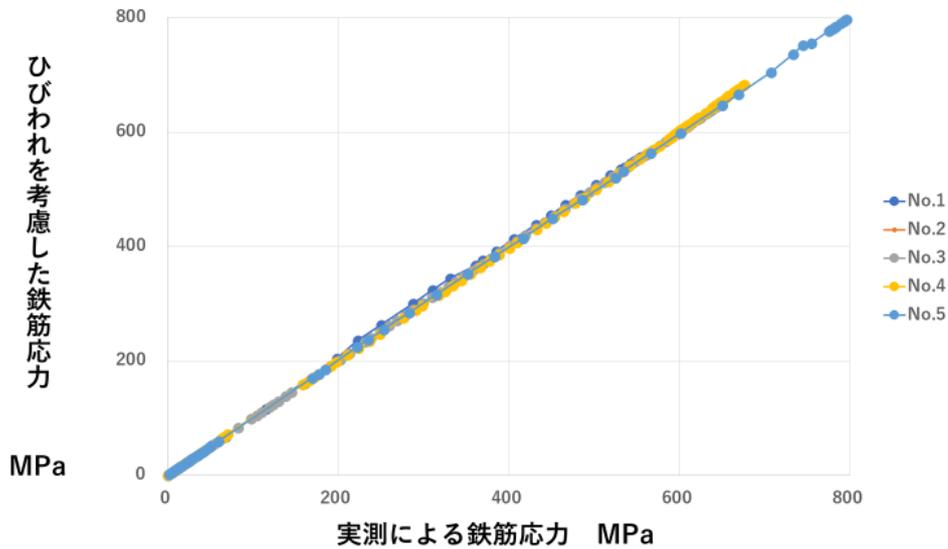


図9:ひびわれ位置の影響を考慮する場合の平均応力への影響

電気式変位計による伸びを供試体長さで除することによっても、鉄筋の平均ひずみを算出することができる。この測定値とひずみの測定値から求めた平均ひずみとは、次図に示すように、必ずしも一致していない。ひびわれ位置での鉄筋ひずみが急増した時点での変化が、ひずみ測定値から求めた平均ひずみは急増するが、変位計から求めた平均ひずみはそれほどの急増を示さないのである。この理由は不明である。後者は、鉄筋が降伏した後も各測定位置におけるひずみ測定値から応力を求めることができるが、前者はそれができないので、後者に基づいて鉄筋の平均ひずみを算定している。

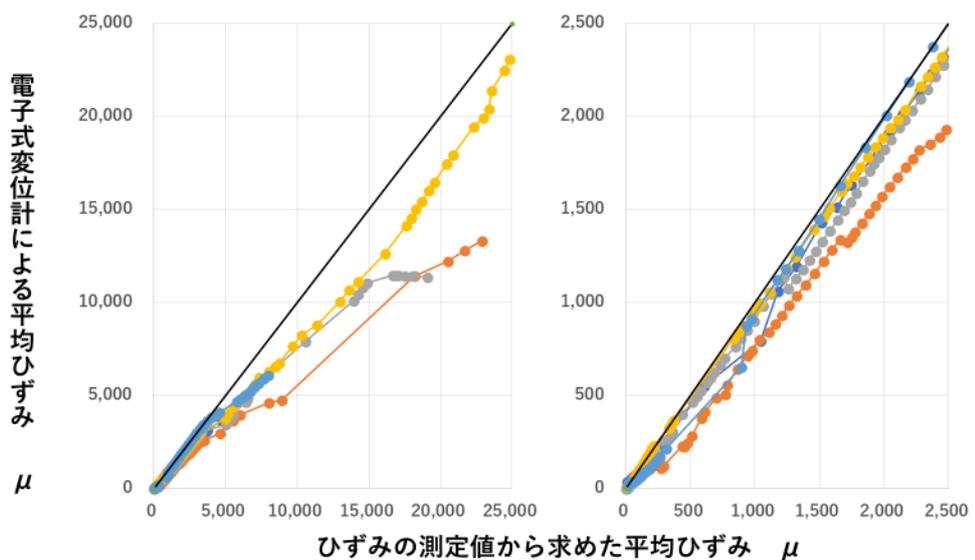


図10:電子式変位計による平均ひずみとひずみゲージによる平均ひずみ

5. 引張力と平均ひずみとの関係

縦軸に引張荷重を鉄筋断面積で除して鉄筋応力度に換算した値(MPa)を、横軸に鉄筋の平均ひずみをとって、両者の関係を図11に示した。鉄筋降伏時に、コンクリートは一定の引張力を受け持っており、鉄筋降伏後も同程度の引張力を負担している。

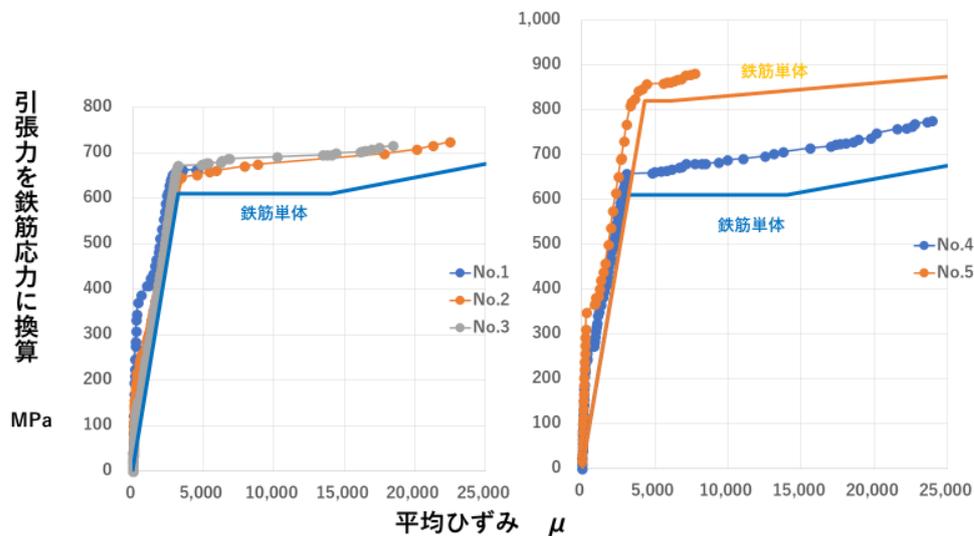


図11:電子式変位計による平均ひずみとひずみゲージによる平均ひずみ

6. 鉄筋降伏後のコンクリートの平均応力とひずみとの関係

各測定位置での鉄筋ひずみの測定値からその位置での応力度を鉄筋降伏後も求めることができ、鉄筋の負担する引張力は鉄筋の平均応力に鉄筋断面積を乗じると求めることができる。全引張力から鉄筋の負担する引張力を差し引けば、コンクリートの負担する引張力を求めることができる。コンクリートの平均応力度は、コンクリートの負担する引張力をコンクリート断面積で除すると求まるのである。なお、コンクリートの平均ひずみは、鉄筋の平均ひずみに一致するので、鉄筋の平均ひずみの測定値がコンクリートの平均ひずみとなる。

このようにして求めたコンクリートの平均応力と平均ひずみの関係を、等価応力 S (コンクリート応力度の引張強度に対する比率) と平均ひずみとの関係で表すと図12のようになる。注目すべきことは、鉄筋の平均ひずみが降伏ひずみを超えても、コンクリートが受け持つ引張力は十分に存在し、ほとんど減少しないことである。

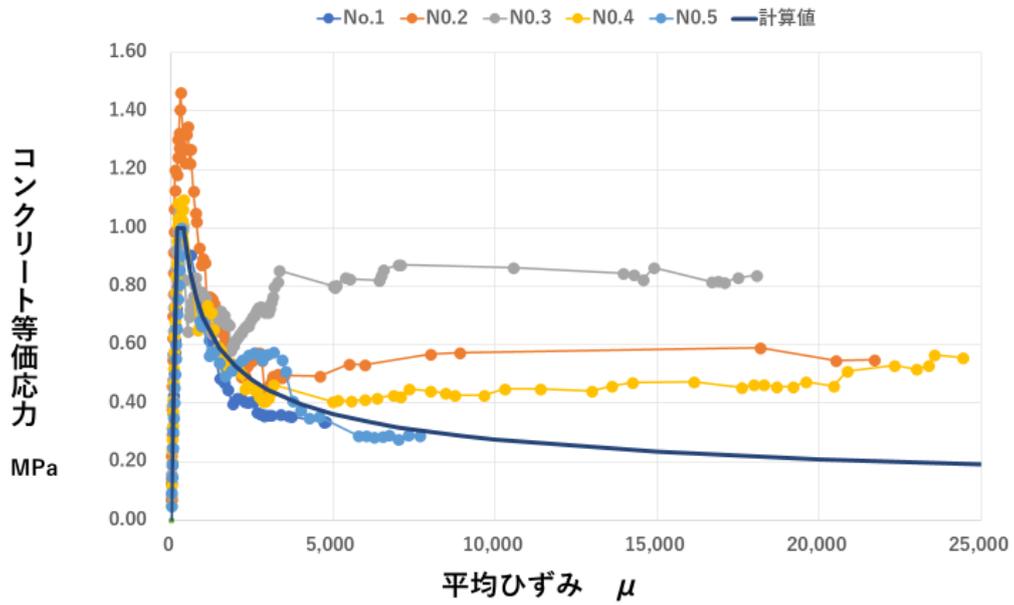


図12:コンクリートの平均応力と平均ひずみの関係

なお、コンクリートの引張強度を等価応力が1となるように変換し、平均ひずみが2,500 μ 以下について示すと、図13のように、実測値は岡村等による計算値とほぼ一致している。

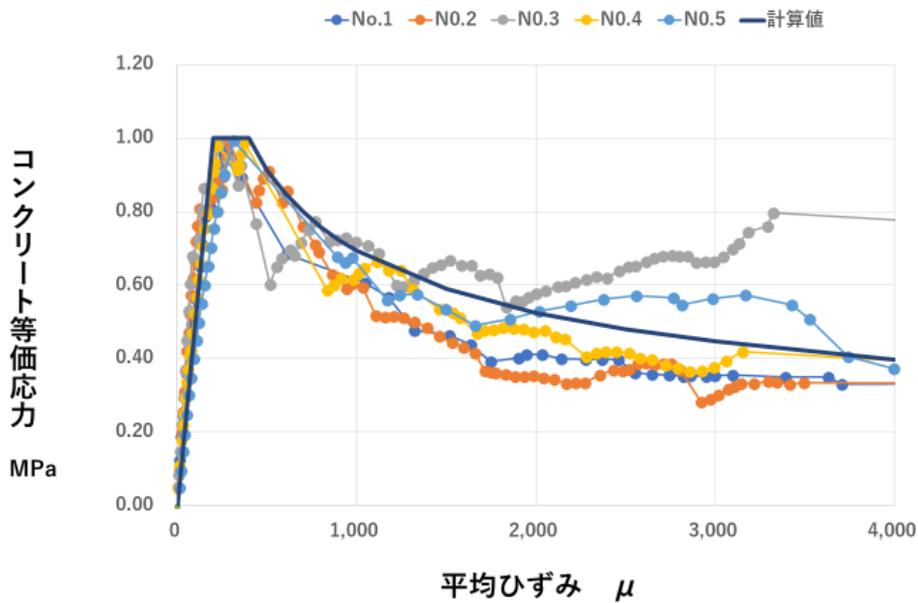


図13:コンクリートの平均応力と平均ひずみの関係2

7. 鉄筋の平均応力・平均ひずみの関係

鉄筋の平均応力と平均ひずみの関係の実測値を図14に示す。ひびわれ位置における鉄筋の応力・ひずみ関係は、鉄筋自体の応力・ひずみ関係と一致する。図に、参考のために載せてある。

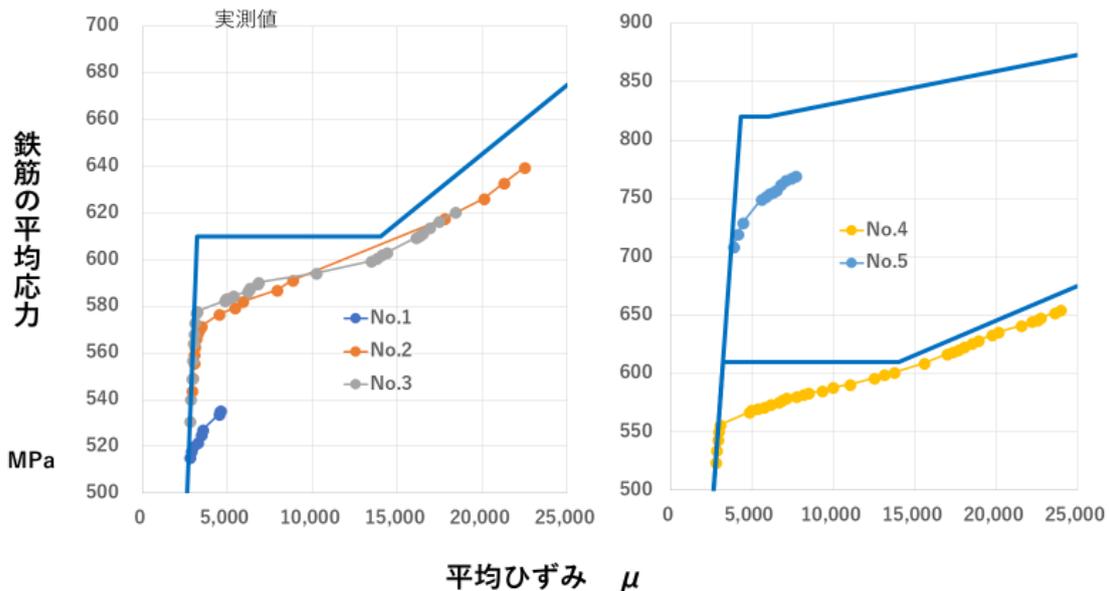


図14:鉄筋の平均応力と平均ひずみの関係(実測値)

鉄筋コンクリート中の鉄筋は、その平均応力が降伏強度に達する前に降伏する。その値は、以下の方法によって、簡単に求めることができる。

- (1) 鉄筋に作用する平均引張力は、鉄筋の平均ひずみに弾性係数を乗じて求めた引張応力に鉄筋断面積を乗ずると求まる。
- (2) コンクリートに作用する引張力は、コンクリートの平均応力・平均ひずみ関係から求まるコンクリートの平均応力にコンクリートの断面積を乗じると求まる。
- (3) 鉄筋の平均引張力とコンクリートの平均引張力とを加えると、鉄筋コンクリートとしての平均引張力が求まる。この値が、ひびわれ面における鉄筋の引張力(鉄筋の降伏強度と鉄筋断面積との積)に一致すると、鉄筋の平均応力が降伏域に入る平均応力と平均ひずみが求まる。

前記の方法によって求めた鉄筋の平均応力が降伏域に入る平均応力の計算値と実測値を次表に示す。両者はほぼ一致している。

表2:鉄筋の降伏時における平均ひずみと平均応力

供試体	平均ひずみ (μ)	平均応力 (MPa)		比率
		計算値	実測値	
No.1	2,446	465	475	1.02
No.2	2,950	561	544	0.97
No.3	3,006	571	571	1.00
No.4	2,782	529	529	1.00
No.5	3,693	702	699	1.00

しかし、鉄筋が降伏域に入った後について、平均応力と平均ひずみを計算で求めることは容易ではない。玉井真一・島弘³は、軸方向の鉄筋応力分布を正弦曲線とする方法を提案している。すなわち、

- (1) 平均ひずみが与えられる。
- (2) コンクリートの平均応力・ひずみ関係を与えると、コンクリートが受け持つ引張力が求まる。
- (3) 鉄筋の応力分布を正弦曲線とすると、その振幅と平均値から、各点の応力が求まる。正弦曲線の平均応力を仮定し、(2)と併せると、鉄筋に作用する最大応力が定まる。なお、振幅は最大応力と平均応力の差である。
- (4) 鉄筋の応力ひずみ関係を用いて、各点の鉄筋応力に対応する各点のひずみが求まり、平均ひずみが定まる。
- (5) (4)で求めた平均ひずみと(1)で与えられた平均ひずみを比較し、収束計算を行って、平均ひずみに対応する平均応力を確定する。

本実験結果を詳細に検討した以上の結果に基づいて、前記の方法に以下の修正を加えることにした。

- (1) コンクリートの平均応力・ひずみ関係は岡村等の提案式を用いるが、ひびわれ位置での鉄筋応力がその降伏強度に達した後は、その値を保持するとした。
- (2) コンクリート中の鉄筋は降伏した直後に直ちにひずみ硬化域に入らないことを考慮する方法として、降伏後における弾性係数を千分の一に減じた値を用いることとした(図17参照)。これによって、前記(5)の収束が容易となる利点がある。

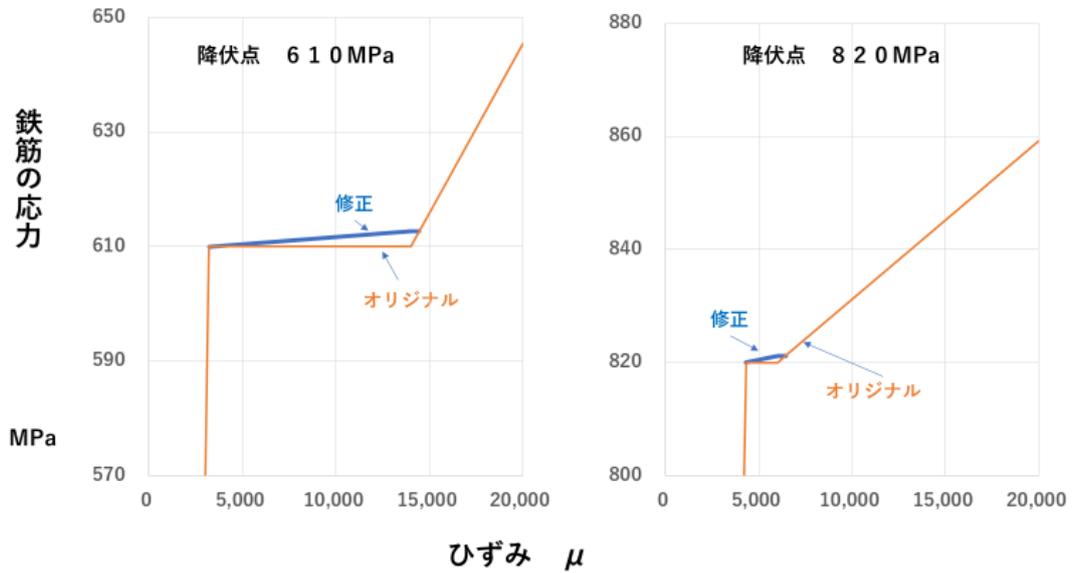


図15:ひずみ硬化域における応力・ひずみ関係の修正

以上の修正を加え、玉井・島の方法によって計算した結果を図16に示す。

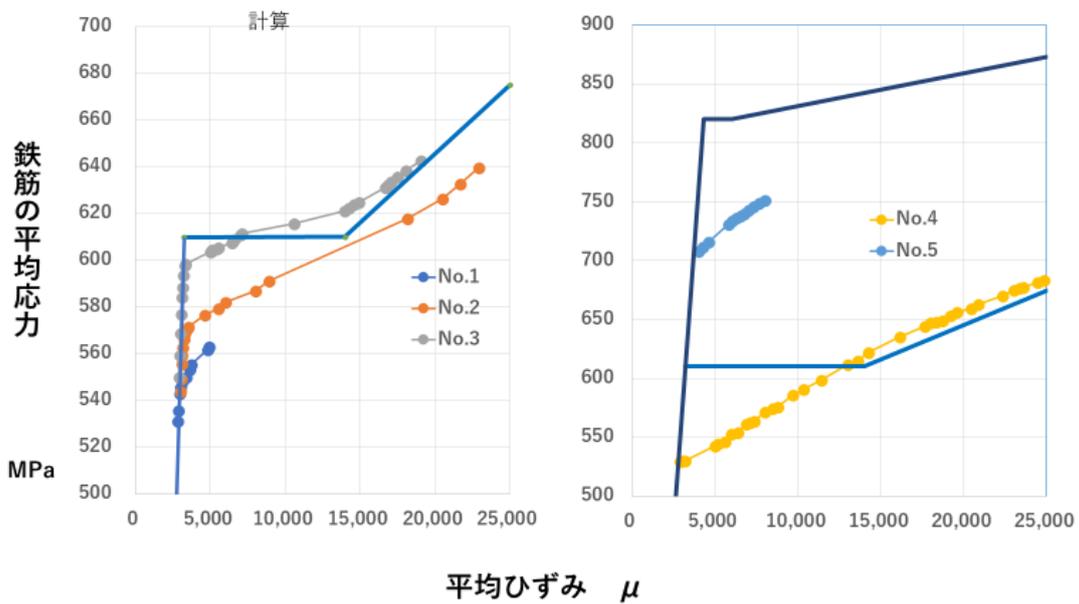


図16:鉄筋の平均応力と平均ひずみの関係(計算値)

計算値に対する実験値の比率は、図17に示すように、0.95 から 1.17 の範囲であつて、前記の方法によって、鉄筋の平均応力と平均ひずみの関係を計算できることが確かめられたのである。

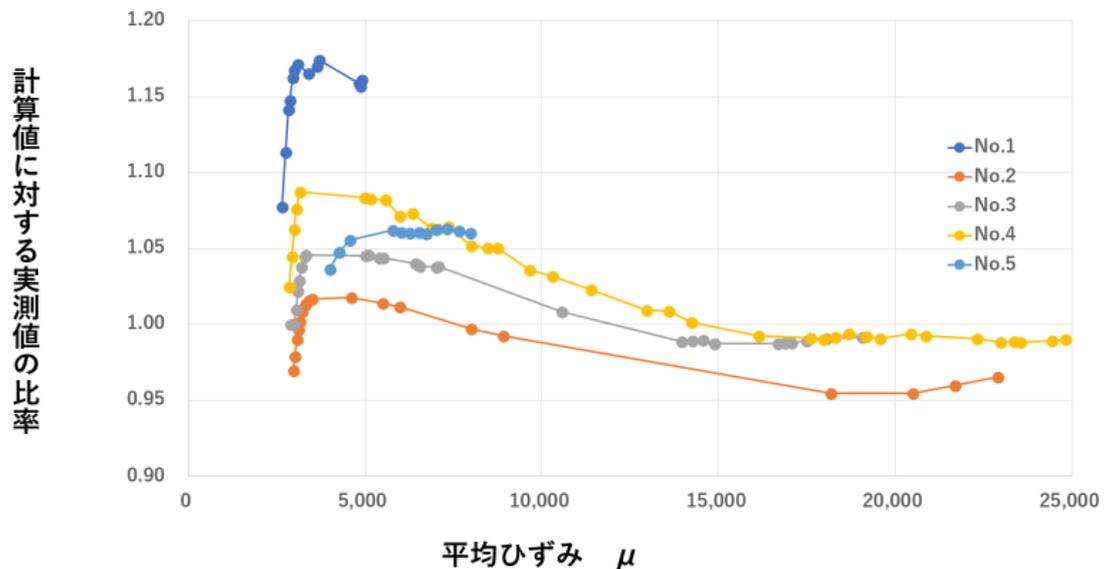


図17:鉄筋の平均応力と平均ひずみについての実則値と計算値の比較

参考文献

- 〈1〉Vecchio, F.J. and Collins,M.P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, pp.219-231, ACI Journal, 1986.3
- 〈2〉Okamura,H.,Maekawa,K. and Sivasubramaniyam,S : Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, pp.528-543, ASCE, 1995
- 〈3〉玉井真一、島弘、出雲淳一、岡村甫: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、pp.239-247, 土木学会論文集 第 378 号/V-6、1987.2