

論文 塑性域での繰り返し荷を受ける鉄筋の脆性破壊

雨宮 明人*¹・檜貝 勇*²・中村 光*³

要旨：本研究では、D19の異形鉄筋を用い、鉄筋の固定長さの変位レベルを変数として正負に交番する強制変位の繰り返し荷試験を行って、塑性座屈後に破断する鉄筋の破断条件を実験的に検討した。その結果、鉄筋の破断は、平均引張ひずみと平均圧縮ひずみに大きく依存するという結論を得た。また、平均引張ひずみと平均圧縮ひずみから破断までの繰り返し回数を推定する式を提案した。

キーワード：鉄筋、塑性座屈、脆性破壊、平均ひずみ、破断条件

1. はじめに

兵庫県南部地震では、多くのRC構造物がせん断耐力の不足により破壊に至る甚大な被害を受けた。そこで震災以後の設計では、横方向鉄筋を多量に配置するようになった。これによって構造物の靱性が増加することは確実であるが、反面、塑性座屈した軸方向鉄筋の破断が生じやすくなる懸念される。

そこで本研究は、塑性域での繰り返し荷を受け座屈した鉄筋の破断条件を実験的に追究することを目的とした。

さらに6φ、18φに変化させた。

図-1に供試体の概要を示す。すべての供試体には、中央断面の横方向変位を計測するために針金を取り付けた。繰り返し荷による破断実験には、すべて(A)を用いた。(B)は、座屈後のたわみ曲線を計測するためのもので、5カ所に変位計測用の針金を取り付けてあり、(C)は、鉄筋のひずみ挙動を計測するためゲージ長2mmの塑性歪ゲージを貼り付けたものである。

表-1 供試体の諸元

鉄筋の種類	異形鉄筋 D19
降伏強度 (MPa)	377
ヤング係数 (MPa)	1.82×10^5
長さ (cm)	18φ、12φ、6φ

(φ=1.91cm)

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた鉄筋は、直角フシ型で、フシ間隔は、10mmのD19異形鉄筋である。表-1に鉄筋の力学的性質を示す。鉄筋の長さ(固定長さ)は、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾に定められている帯鉄筋の最大間隔である12φを基準とし、

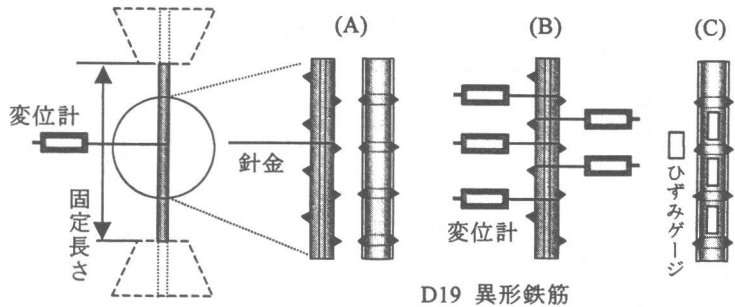


図-1 供試体概要

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)
 *2 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)
 *3 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

2.2 実験方法

実験の概略図を図-2に示す。実験には疲労試験機を用いた。鉄筋を油圧チャックで固定し、正負に交番する強制変位を繰り返して破断させた。実験におけるパラメータは、鉄筋の固定長さ（18φ、12φ、6φ）と平均ひずみ（ $\bar{\epsilon} = \Delta\ell / \ell$ ）で、No.1~No.4の4シリーズに分けて実験を行った。図-3は荷重パターンである。表-2に示すように、引張側の平均ひずみの最大値（ $\bar{\epsilon}_t$ ）（以後、これを平均引張ひずみと言う）を0、3,000μ、15,000μ、30,000μとし、圧縮側の平均ひずみの最大値（ $\bar{\epsilon}_c$ ）（以後、これを平均圧縮ひずみと言う）を-10,000μ~-50,000μに変化させた（μ：10⁻⁶）。

実験はすべて変位制御で行い、荷重手順としては、第1サイクルは静的荷重とし、その後は、荷重速度を0.1Hzとした動的繰り返し荷重を行った。この時の計測項目としては、①荷重、②軸方向変位（ $\Delta\ell$ ）、③供試体中央断面の横方向変位（ δ ）、④破断時までのcycle数Nである。また、一部の供試体については、たわみ曲線やひずみの測定も行った。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果および破断状況

図-4に座屈後の鉄筋の挙動を示す。これは、供試体(B)より得られた横方向変位の測定結果を示したものである。図中の実線は、固定長さ ℓ を一波長とするSin曲線を示している。図-4

からもわかるように、座屈後のたわみ曲線は、固定長さに関係なくほぼSin曲線で近似できる。

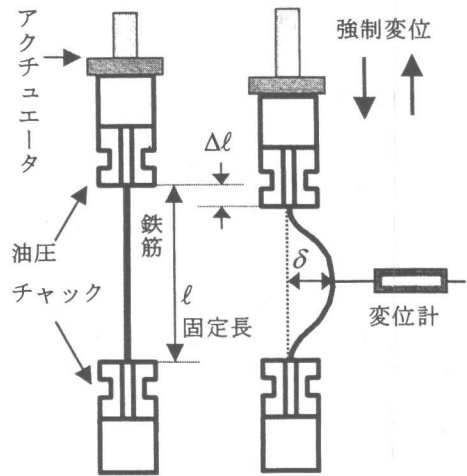


図-2 実験の概略図

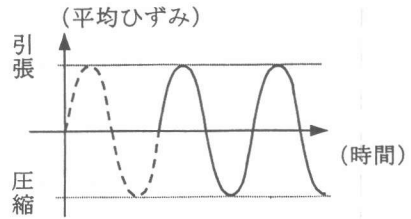


図-3 荷重パターン概念図

表-2 荷重条件

	No.1	No.2	No.3	No.4
引張側	0	0.3	1.5	3.0
圧縮側	-1.0, -2.0, -2.5, -3.5, -4.0, -5.0			

(平均ひずみ：10⁻²)

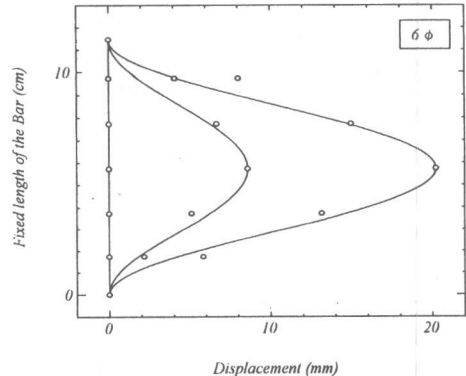
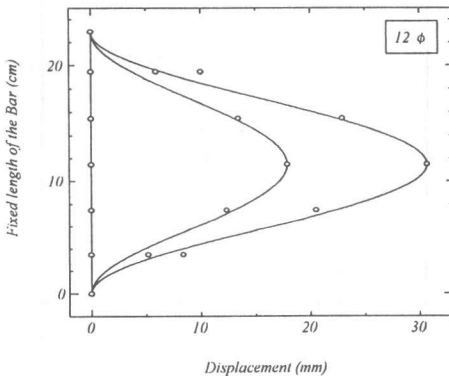


図-4 たわみ曲線

図-5は、繰り返し载荷を受ける鉄筋の荷重と軸方向変位の関係を示し、図-6は、荷重と横方向変位の関係を示したものである(固定長さ: 18ϕ 、 $\bar{\epsilon}_t$: $30,000\mu$ 、 $\bar{\epsilon}_c$: $-50,000\mu$)。他の固定長さ、シリーズについても同様な結果を得ている。いずれの場合も圧縮側変位において、鉄筋の塑性座屈が確認されている。また、一度座屈を起こすと急激に荷重が低下することがよくわかる。

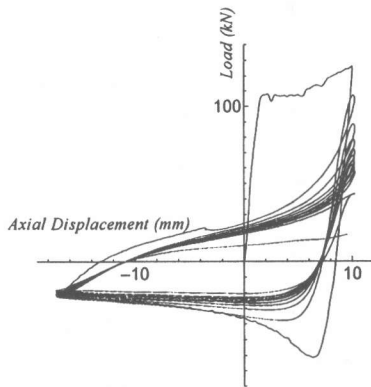


図-5 荷重-軸方向変位

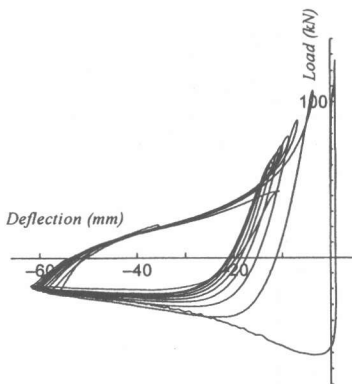


図-6 荷重-横方向変位

図-7に、鉄筋のひずみ計測結果の一例を示す(固定長さ: 18ϕ 、 $\bar{\epsilon}_t$: $30,000\mu$ 、 $\bar{\epsilon}_c$: $-50,000\mu$)。また、図-8には、単調引張加力による応力とひずみの関係を示す。すべての実験において鉄筋は、リブではなく節の方向へ座屈し、圧縮側からクラックが進展して破断している(図-9)。これは、圧縮側のひずみ振幅が引張側より大きいためと考えられる。また、破断

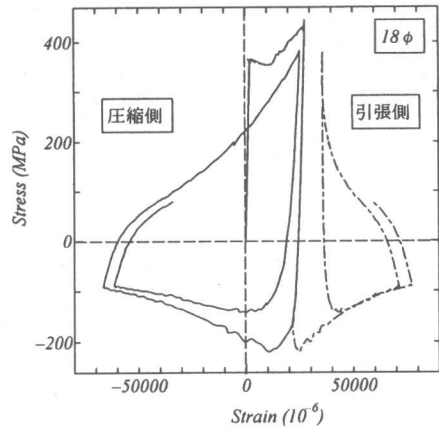


図-7 応力-ひずみ

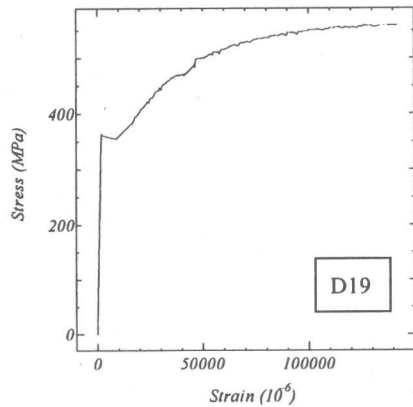


図-8 単調引張による応力-ひずみ

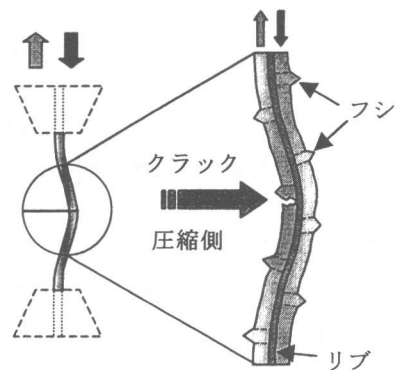


図-9 鉄筋の破断状況

面は、脆性破壊と思われる断面が観察された。表-3に各シリーズにおける鉄筋の破断回数(cycle数)の実験結果を示す。平均ひずみに着目すると、破断回数は平均ひずみの増加と共に減少する傾向が見られる。

表-3 実験結果

固定長さ	実験 No.	平均引張ひずみ ($\bar{\epsilon}_t$)	平均圧縮ひずみ ($\bar{\epsilon}_c$)	破断回数 (N)	平均破断回数 (\bar{N})
18φ	No.1	0	25,000	68,75,81,65	72.3
			50,000	30,28,28	28.7
	No.2	3,000	10,000	90	90
			20,000	53,55,50	52.7
			25,000	44	44
			40,000	24	24
			50,000	19,19,21	19.7
	No.3	15,000	25,000	36,38,35	36.3
			50,000	18,18,19	18.3
	No.4	30,000	25,000	21,20	20.5
			50,000	13,13,11,11	12
	12φ	No.1	0	25,000	56,66,62
50,000				17,18,19,15	17.3
No.2		3,000	10,000	81,80,77	79.3
			20,000	32,35,37	34.7
			25,000	30,26,34	30
			40,000	22,23,16	20.3
			50,000	12,11,13	12
No.3		15,000	25,000	31,21,26	26
			50,000	13,11,13	12.3
No.4		30,000	25,000	14,15,14	14.3
			50,000	9,8,8	8.3
6φ		No.1	0	50,000	21,24,22,20
	25,000			71	71
	No.2	3,000	35,000	28,30	29
			40,000	24	24
			50,000	15,16,13	14.7
			50,000	15,16,13	14.7
	No.3	15,000	35,000	23,22	22.5
			50,000	10,12,12	11.3
	No.4	30,000	35,000	11,12,11	11.3
			50,000	7,9,7	7.7

(ひずみ: 10^{-6})

3.2. 平均ひずみと破断までの载荷回数との関係

3.2.1 平均圧縮ひずみと破断回数の関係

繰り返し载荷を受ける鉄筋は、圧縮側からクラックが進展して破断していることから、まず、平均圧縮ひずみと破断回数の関係を図-10に示す。図によれば破断回数は、顕著に平均圧縮ひずみの影響を受けていることが分かる。ただし、固定長さの違いにより破断回数が異なる傾向にあるものと考えられる。

地震による構造物の応答を考えたとき破断回数の大きいものは対象外とするのが妥当である。そこで以後、破断回数が50回以下のデータに注目することとした。

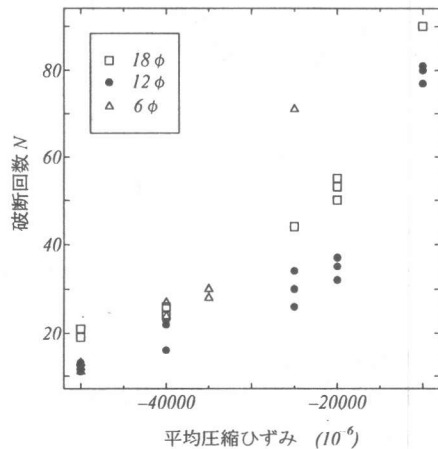


図-10 平均圧縮ひずみと破断回数の関係

3.2.2 平均引張ひずみと破断回数の関係

図-11に、圧縮ひずみを $-50,000\mu$ と固定し、引張ひずみだけを変化させたときの平均引張ひずみと破断回数の関係を示す。 $\bar{\varepsilon}_i$ が、降伏初期までの $3,000\mu$ 以下や、ひずみ硬化域にある $13,000\mu$ 以上の領域においては、ひずみレベルの増加と共に破断回数が低下するが、その中間の降伏棚領域では $\bar{\varepsilon}_i$ の影響が小さいことが分かる。

図-10と図-11の結果から、破断回数は圧縮・引張の平均ひずみに大きく依存しているといえる。

4. 平均ひずみによる破断条件の検討

ここで、破断条件について検討してみる。破断条件が平均圧縮ひずみと平均引張ひずみの二つの要因のみに依存すると仮定し、その関係を式(1)で表す。

$$\log N = \alpha \bar{\varepsilon}_c + \beta \bar{\varepsilon}_i + \gamma \quad (1)$$

N は破断回数、 $\bar{\varepsilon}_c$ は平均圧縮ひずみ (負)、 $\bar{\varepsilon}_i$ は平均引張ひずみ (正) である。

表-4 係数および変動係数

	α	β	γ	変動係数	DATA 数
18φ	26.61	-24.35	4.52	12.1%	17
12φ	26.99	-23.69	4.13	13.1%	25
6φ	33.27	-33.15	4.63	12.7%	20
全供試体 ($N \leq 50$)	27.43	-26.57	4.32	20.8%	62

最小二乗法により定めた係数の値は、表-4のとおりである。また、これらの式について、 N_{exp} (実験値) と N_{cal} (計算値) の比の変動係数も示した。各固定長さによって係数が変化する傾向もあるが、全供試体 (破断回数 50 回以内) についての、変動係数は 20.8% であって、この種の実験としては比較的良好な推定精度であると思われる。

図-12は、破断回数 N の実験値と計算値を比較して示したものである。

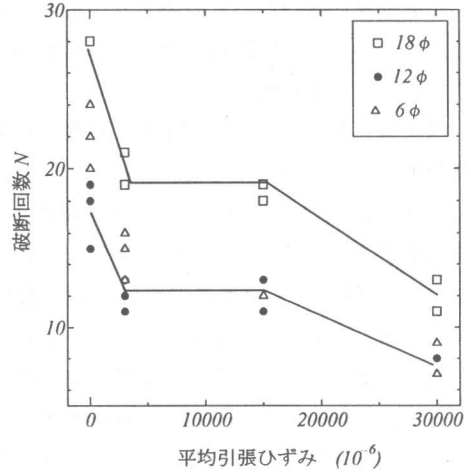


図-11 平均引張ひずみと破断回数の関係

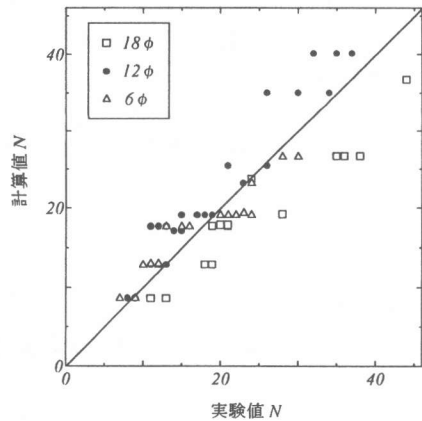


図-12 解析値と実験値との比較

5. 今後の課題

本研究で得られた破断条件は、一種類の鉄筋の実験結果に基づいたものであり、種類の異なる鉄筋においても同様な結果が得られるかは、さらに検討する必要がある。

固定長さを 12ϕ および 6ϕ とした鉄筋の中央断面で測定したひずみを図-13, 14に示した。平均圧縮ひずみ ($\bar{\varepsilon}_c$) は、 $-40,000\mu$ 、平均引張ひずみ ($\bar{\varepsilon}_t$) は、 $3,000\mu$ で同一である。 $\bar{\varepsilon}_c$ 、 $\bar{\varepsilon}_t$ は同一でも固定長さが違えば、実際に発生するひずみは大きく異なっていることがわかる。平均ひずみによる破断条件は実用的ではあるが、物理的な意味を持った破断条件を得るためには、実ひずみと関連させた検討も必要と思われる。

本実験では、油圧チャックを用いて鉄筋を固定した。また、鉄筋の軸方向変形はアクチュエータ変位で計測した。しかし、チャック部内での変位などのため、アクチュエータ変位は鉄筋の変形より大きくなる傾向が認められているので、これについては改善策を検討している。

6. 結論

塑性域での繰り返し载荷を受ける鉄筋の脆性破壊に関する実験より得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 平均引張ひずみと平均圧縮ひずみが破断の主要因であると思われる。
- (2) 平均引張ひずみと平均圧縮ひずみから破断までの繰り返し回数を推定する式を提案した。

$$\log N = 29.25\bar{\varepsilon}_c - 26.84\bar{\varepsilon}_t + 4.42$$

【参考文献】

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[耐震設計編]、平成8年度制定、pp. 18、1996

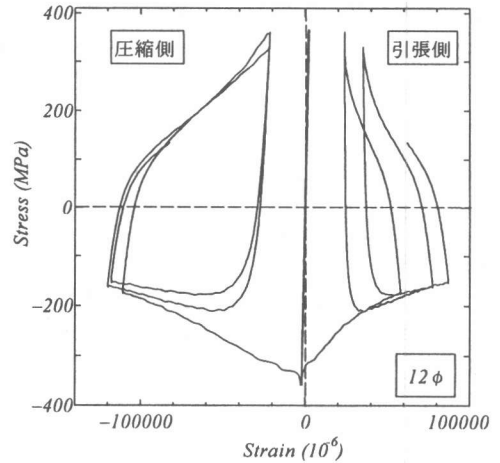


図-13 応力-ひずみ (12φ)

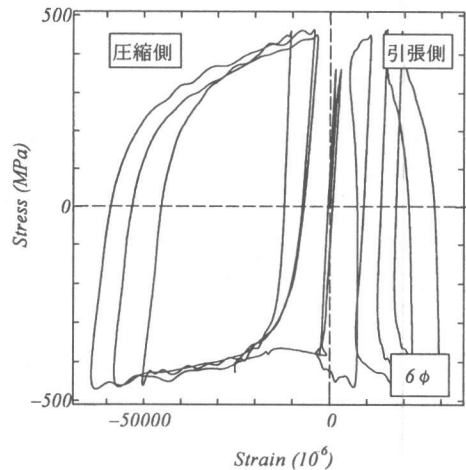


図-14 応力-ひずみ (6φ)