

# 塑性域から座屈域にわたる大変位の繰り返しを受ける異形鉄筋の破壊条件に関する研究

梶貝 勇<sup>1</sup>・中村 光<sup>2</sup>・斉藤成彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)  
E-mail: higai@yamanashi.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻  
(〒463-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>3</sup>正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科

RC部材の変形能力を大きくして耐震性を向上させる目的で、多量の横方向鉄筋を密に配置することが一般的になってきている。このようにすれば軸方向鉄筋の弾性座屈は防止できるが、鉄筋降伏以後の塑性座屈を防止することは困難である。従って、強震時において軸方向鉄筋は引張塑性域から圧縮座屈域にわたる変位の繰り返しを受けることになり、低サイクル疲労による鉄筋の破断が懸念される。本研究は、D19異形鉄筋に強震時を想定した大変位の繰り返し载荷を行って、その破壊条件を検討したものである。

*Key Words* : low cycle fatigue, deformed bars, plastic strain, buckling, failure criterion

## 1. はじめに

兵庫県南部地震クラスの大地震に対してRC構造物の崩壊を防止するためには、例えば単一柱式橋脚であれば変位靱性率10程度の、従来の常識を超える大きな変形能力を付与する必要がある。そのためには、せん断破壊を防止して曲げ型の破壊に誘導すること、さらに、曲げ破壊においても、帯鉄筋などの横方向筋を密に配置することによって、軸方向鉄筋の早期座屈を防止すると同時に、圧縮部コンクリートの拘束を強化してピーク応力以後の軟化を軽減するのが効果的であること、などが明らかにされ、新しい耐震設計はそのような方向に向かっている。

横方向鉄筋を多量にかつ密に配置すれば、軸方向鉄筋の支持間隔が短くなるので、弾性座屈は完全に防止できる。しかし、横方向の支持間隔を極端に小さくしない限り、鉄筋降伏以後の塑性座屈を防止することは困難である。さらに、短い座屈長で座屈した鉄筋では、断面の曲率が著しく増加するので、少ない回数繰り返し载荷によって脆性的な破断を生ずることも懸念される。実際、近年行われている、多量の横方向鉄筋を配置したRC柱部材の耐震性確認実験においても、そのような事実が確認されてい

る。

軸方向鉄筋の破断は構造物の倒壊をもたらすものであり、絶対に避けなければならない。しかし、コンクリート中に配置された鉄筋の座屈性状、座屈した鉄筋の破壊条件などに関する研究は内外を問わずほとんど行われておらず、RC構造物の耐震設計に適用できるような状態ではない。

本研究は、地震時における軸方向鉄筋の低サイクル疲労破壊条件を明らかにすることを最終目的として実施したものである。まず、油圧チャックを備えた疲労試験機を用いて、固定長さを変化させた異形鉄筋に、塑性域の引張から座屈域の圧縮にわたる強制変位の繰り返し载荷試験を行って、一定変位の繰り返しに対する破壊条件を検討した。さらに、地震時における载荷条件を簡単に近似した、変動する変位による繰り返し载荷試験を行って、ランダム波形に対する破壊条件についても検討を行った。

## 2. 実験方法

### (1) 実験の概要

実験に用いた鉄筋は、ふし間隔10mmの直角ふし型

異形鉄筋 D19 で、その力学的性質は表-1のとおりである。荷重には油圧サーボ式疲労試験機を用いた。この試験機は最大荷重 200kN の油圧チャックを備えており、鉄筋の圧縮試験および引張試験が可能である。

**a) 一定変位振幅の繰り返し载荷試験 (Aシリーズ)**

鉄筋を上下の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载荷することにより破断させた。実験におけるパラメータは、鉄筋の固定長  $l$  (18d, 12d, 6d, d: 鉄筋公称直径) と、ピーク変位時における平均ひずみ (引張を+とする) である。

土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編<sup>1)</sup>では、軸方向鉄筋には直径の12倍以下の間隔で横方向鉄筋を配置することが規定されているので、本実験における鉄筋の固定長はこれを考慮して定めたものである。また強制変位の大きさについては、最大引張変位時の平均ひずみ ( $\epsilon_{1}$ : 以後、ピーク引張ひずみという) を 0~20,000 $\mu$ 、最大圧縮変位時の平均ひずみ ( $\epsilon_{2}$ : 以後、ピーク圧縮ひずみという) を -13,000~-54,000 $\mu$  の範囲で、鉄筋破断までの繰り返し载荷回数が約 40 回以下となるように試的に決定した (表-2 参照)。

载荷試験は変位制御で行ったが、まず、第1サイクルは静的载荷とし、その後は、鉄筋が破断するまで载荷速度を 0.1Hz とした正弦波形による動的载荷を行った。

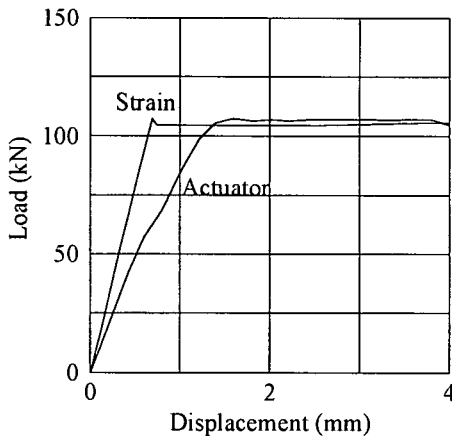


図-1 鉄筋変形とアクチュエータ変位

表-1 鉄筋の力学的性質

シリーズ	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>
A	359	—	1.78
B	372	575	1.79

**b) 変動する変位振幅による繰り返し载荷試験 (Bシリーズ)**

このシリーズでは、鉄筋の固定長は 18d のみとした。強制変位に関しては、ピーク引張ひずみ~ピーク圧縮ひずみを 10,000~-25,000 $\mu$ 、10,000~-50,000 $\mu$ 、20,000~-35,000 $\mu$ 、30,000~-25000 $\mu$  とした4つの基本条件を、ランダムな順番で組み合わせた6種の载荷パターンを用いた。

この場合も、変位制御で、第1サイクルは静的载荷とし、第2サイクル以後は、载荷速度を 0.1Hz とした三角波による動的载荷を行った。

**(2) 鉄筋変形の計測方法の検討**

図-1は、鉄筋の固定長を 18d (18×19.1=343.8mm) とした場合の引張試験結果を示したものである。疲労試験機のアクチュエータ変位 (Actuator) は、鉄筋中央に貼付けた2枚のひずみゲージで測定したひずみから計算した変位 (Strain) の2倍程度と大きく異なっており、アクチュエータ変位によって鉄筋の変形を測定することはできないことが分かった。詳細は省略するが、7個の変位計を用いて同様の引張試験を行い、アクチュエータ変位と鉄筋の伸びが大きく異なる原因を検討したところ、誤差の約40%は、上下チャック自体の動きによるものであり、残りの約60%は、チャックからの鉄筋のすべり、および、チャックの歯と接触している部位での鉄筋の弾塑性変形によるものであることが分かった。

これらの結果を考慮して、図-2に示すような計測方法を考案した。原理的に言えば、まず、上下のチャックの直近に、それぞれ計測用の鋼製リングをネジ止めする。つぎに、上のリングに固定したフレキシブルなワイヤーを下のリングに取り付けられているプラスチックのローラーを介して、変位計Aに

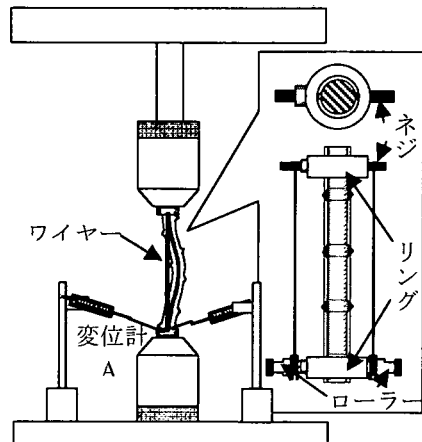


図-2 軸方向変形の計測方法

張力がかかった状態で接続する。この変位計によって、上下リング間の距離の変化、すなわち鉄筋の変形を計測する方法である。ただし、実際には、下記のようないくつかの細かい配慮が必要であった。

リングを鉄筋に単にネジ止めたのでは、引張塑性域で鉄筋が細くなったときに緩んでしまい、正確な計測は困難である。そこで、図-3に示すように、リングの取り付けネジを常にバネで押すことにより、引張塑性域でも緩みのない構造とした。バネの自由長は約14mm、バネ係数は約50N/mmである。このようにしても、変位計Aは試験機の床に固定されているため、下側チャックに動きがあると計測誤差が生ずることになる。これを避けるために、図-4に示すように、下側の計測リングに固定した別のワイヤーを変位計Bに接続して、下側リングの動きを補正することとした。なお、リングから変位計までのワイヤーの長さ及び角度は、変位計A、Bについて同一となるようにする必要がある。また、ワイヤーはフレキシブルで伸びのない物が望ましいので、外径0.5mmの鋼ワイヤーストランドを用いた。さらに、計測時におけるワイヤーの伸びを極力小さくするために、破断応力近くまでプレロードしたものを使用している。

図-5は、上記の方法を用いて鉄筋の引張変形を計測した例である。提案方法による結果(Proposed)が破線で、確認のために上下リングの変位を別に取り付けた2個の変位計で直接測定した結果(LVDT)が実線で示されている。繰り返しも含めて約6%の大ひずみまで、精度の良い計測が可能であることが分かる。このような比較は、引張側においては可能であるが、座屈域に達する圧縮側では、チャックの間隔が短くなるので変位計のセットが困難であること、また、鉄筋の座屈方向が一定でないため座屈した鉄筋が変位計に当たるなど、計測上の困難が多いため、圧縮側でのキャリブレーションは行なえなかった。

### 3. 一定振幅の繰り返し载荷を受ける異形鉄筋の疲労破断

#### (1) 破壊性状

鉄筋の固定長 $l$ を18d, 12d, 6dとし、それぞれについて、ピーク引張ひずみ( $\epsilon_t$ )とピーク圧縮ひずみ( $\epsilon_c$ )の値を変化させた7~8種の条件で繰り返し载荷試験を実施した。各条件に対して、少なくとも3体以上の供試体の実験を行ったのであるが、実験後に変形データの精査を行い、例えば、左右の変位計の測定値が著しく異なる、あるいは、アクチュ

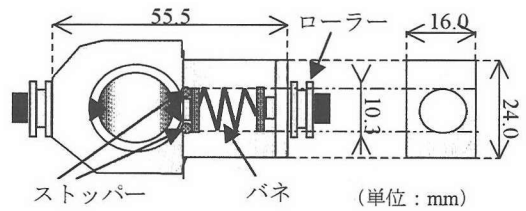


図-3 計測リング

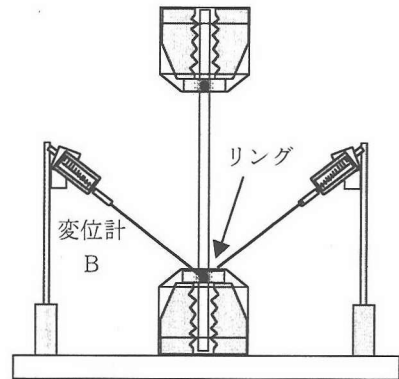


図-4 補正用の変位計測

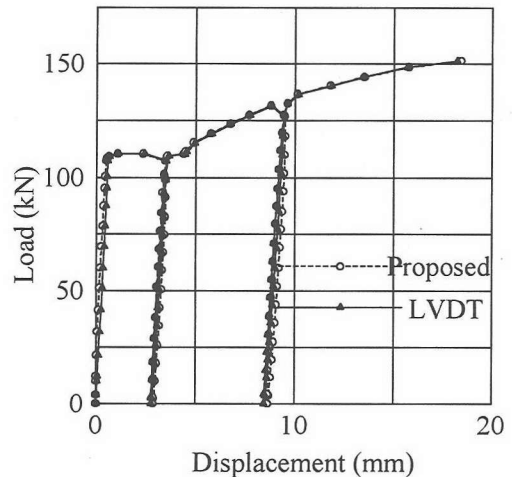


図-5 軸方向変形の計測結果

エータ変位と鉄筋の変形の相互関係が他の供試体とは大きく異なるなど、問題があると思われるものを除外したため、条件によっては供試体数が1~2となったものもある。実験の概要は、表-2に示した。

図-6および7は、各供試体の荷重~軸方向変形を示したもので、図-6は固定長18dの载荷条件4、図-7は6dの条件3についての例である。

固定長が18dと長い場合には、第1サイクルにおいて、塑性域の引張载荷後に除荷し、さらに圧縮力

表-2 一定振幅による実験の概要

(歪み:  $10^{-6}$ )

固定長	載荷条件	ピーク歪目標値		ピーク歪実測平均値		供試体数	破断時のサイクル数	
		引張	圧縮	引張	圧縮		各供試体	平均値
18d	1	0	-49000	-2800	-50300	4	20, 28, 24, 25	24.3
	2	9000	-25000	8900	-28500	3	34, 25, 32	31.0
	3		-35000	8100	-36700	4	25, 25, 19, 33	25.5
	4	20000	-50000	8400	-52300	6	14, 15, 17, 15, 14, 12	14.5
	5		-29000	19600	-31400	5	26, 24, 23, 25, 28	25.2
	6		-40000	20500	-41400	3	18, 15, 17	16.7
	7		-54000	19800	-56700	6	13, 14, 9, 12, 13, 18	13.2
12d	1	0	-44000	-5600	-48900	2	17, 19	18.0
	2	8000	-20000	9000	-21300	2	16, 31	23.5
	3		-29000	7600	-32300	1	23	23.0
	4	18000	-45000	7500	-49200	4	10, 10, 9, 9	9.5
	5		-20000	14200	-23700	1	25	25.0
	6		-29000	16800	-33000	3	15, 13, 13	13.7
	7		-45000	13800	-46500	1	10	10.0
	8		-52000	18500	-55700	3	6, 6, 5	5.7
6d	1	0	-35000	-12400	-46100	3	25, 31, 32	29.3
	2	6000	-20000	3200	-29700	2	37, 24	30.5
	3		-24000	3400	-32000	4	18, 20, 17, 14	17.3
	4	13000	-35000	1200	-38800	1	10	10.0
	5		-13000	9300	-22200	4	19, 29, 26, 19	23.3
	6		-20000	7600	-29800	2	24, 17	20.5
	7		-26000	9800	-35300	1	8	8.0
	8		-35000	8700	-45100	2	7, 10	8.5

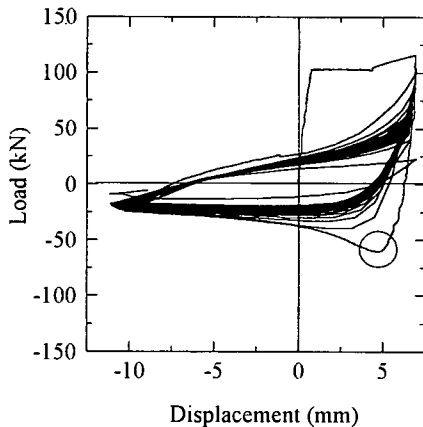


図-6 荷重～変位曲線 (l/d=18)

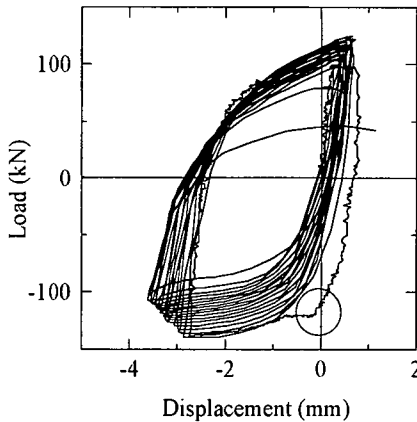


図-7 荷重～変位曲線 (l/d=6)

が載荷された段階で、降伏荷重以下の荷重によって (図中の丸印) 弾性座屈を生じ、それ以後は、圧縮変位の増加に伴って圧縮力は徐々に低下している。第2サイクル以後は、サイクル数の増加に伴って、引張ピーク変位時の荷重および圧縮側の最大荷重が

徐々に低下しつつ、次第に安定したループに移行している。

一方、固定長が6dと短い場合は、1サイクル目の圧縮側で、圧縮力が降伏荷重に達した後に (図中の丸印) 横方向のたわみが急増して塑性座屈を生じた

のであるが、その後ひずみ硬化により荷重はさらに増加している。第2サイクル以後、サイクル数の増加に伴って、引張、圧縮とも、ピーク変位時の荷重は徐々に低下している。全体に履歴ループは紡錘型でエネルギー吸収の大きい形である。

固定長が 12d の場合は、上記両者の中間的な挙動であるが、弾性座屈を生じており、18d の場合により近い性状である。

いずれの場合にも、図-8 に概念的に示したように、座屈はリブとほぼ直交する方向に生じた。また、座屈した鉄筋の圧縮側（凹側）からクラックが発生し、それが徐々に進展して破断に至ることが分かった。圧縮側からクラックが発生するのは、圧縮縁におけるひずみ振幅が、引張縁のそれを上回るためであると考えられる。

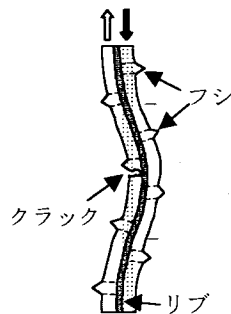


図-8 破断状況

## (2) 破壊条件の検討

図-9 は、ピーク変位時の平均ひずみ  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_t$  の目標値と、破断までの繰り返しサイクル数  $N$  の関係を示したものである。図中の数字はピーク引張ひずみの目標値である。当然予測されるように、 $\epsilon_c$  または  $\epsilon_t$  の絶対値が大きいくほど破断時のサイクル数は減少している。また、全体的に見ると、鉄筋の固定長  $l$  が短いほど同じピークひずみに対する  $N$  は小さくなる傾向が認められる。

そこで、 $N$  と  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_t$  の関係を式 (1) のように仮定して、最小二乗法により各固定長毎に最適な係数  $A$ ,  $B$ ,  $C$  を求めると、図-10 のような結果であり ( $A$  は負の値)、平均ひずみの効果は  $l/d$  の値によって異なること、また、 $\epsilon_c$  の効果と  $\epsilon_t$  の効果も同一ではないことが分かる。なお、係数  $C$  は  $l/d$  によらずほぼ一定と見なすことができる。

$$N = EXP(A \cdot \epsilon_t + B \cdot \epsilon_c + C) \quad (1)$$

これらの結果から、式 (2) の関係を仮定して、

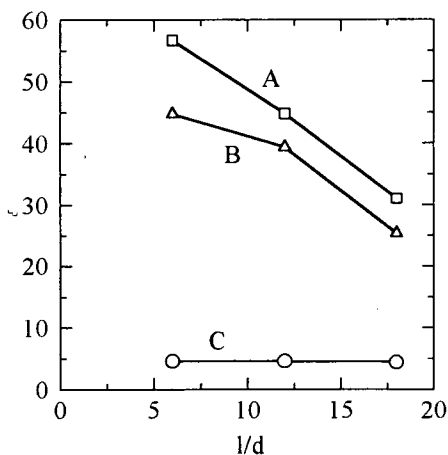


図-10 式 (1) の係数

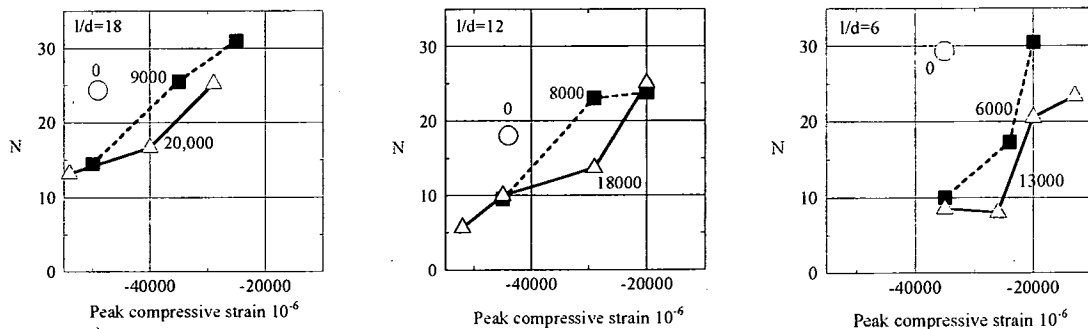


図-9 ピークひずみと破断回数との関係

表-3 破断回数推定式の適合性

	18d	12d	6d	全体
供試体数 n	41	19	21	81
平均値	1.02	1.14	1.08	1.06
標準偏差	0.216	0.253	0.324	0.262
変動係数 %	21.3	22.1	30.0	24.7

$$N = EXP\left\{\left(A \cdot \frac{l}{d} + B\right)\epsilon_t - \left(C \cdot \frac{l}{d} + D\right)\epsilon_c + E\right\} \quad (2)$$

このようにして得られた最適な係数は、 $A=2.019$ 、 $B=-67.61$ 、 $C=1.254$ 、 $D=-49.55$ 、 $E=4.502$ である。式(2)による破断回数の計算値  $N_{cal}$  と、実測値  $N_{exp}$  の関係は図-11および表-3に示した。表-3に見られるとおり、全データについて、破断回数の計算値と実測値の比率 ( $N_{cal}/N_{exp}$ ) の平均値は1.02で、その変動係数は24.7%である。推定の適合度(平均値)は固定長によらずほぼ1.0に近く特定の傾向は認められないが、変動係数は6dの場合にやや大きくなっており、塑性座屈域での実験の難しさを示しているものと思われる。これらの結果は極めて満足なものとは言えないが、このような複雑な破壊に対する推定としては悪くない結果であると考えられる。

(3) 直径が異なる鉄筋への適用性の考察

式(2)はD19を用いた実験結果から統計的に導いたもので、鉄筋径が異なる場合については実験を行っていない。我々の研究室では設備の制約により、これ以上太径の鉄筋の実験はできないので、直径が異なる鉄筋への適用性については解析的に検討することとした。

すなわち、鉄筋の座屈挙動を、鉄筋をはり要素でモデル化し有限変形理論を適用した有限要素法解析により検討したのである。ここで、はり要素は、2節点12自由度を有する3次元要素とし、ファイバーモデルにより材料非線形性を考慮した。各ファイバーに用いる鉄筋の応力~ひずみ関係は、福浦・前川のモデル<sup>2)</sup>を用いた。解析は実験における境界条件を考慮して、両端固定条件とし、鉄筋端部の軸方向変位を制御することで行った。また、座屈を生じさせるために、鉄筋の軸方向中央位置に初期不整量に相当する微小な水平力を与えた。解析についての詳細は文献<sup>3)</sup>を参照されたい。この解析により、本実験のような、塑性域の引張変形から座屈域の圧縮変形の繰り返し载荷を受ける鉄筋の挙動が、良い精度で求められることは既に確認されている。

図-12は、D25を用い、 $l/d$ を18とした場合に

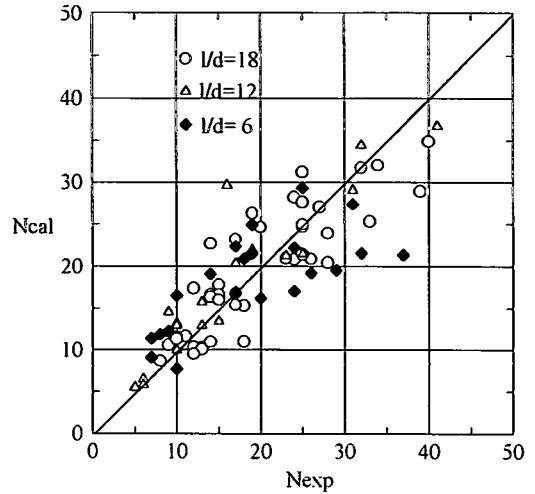


図-11 破断回数の比較

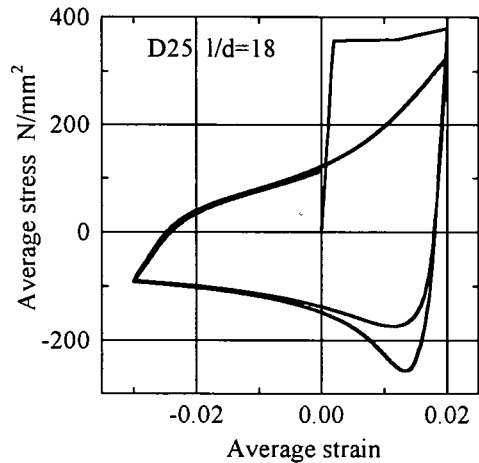


図-12 D25の応力~ひずみ関係

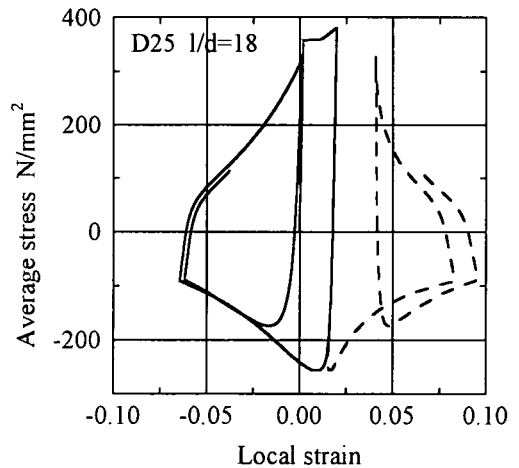


図-13 D25の局所ひずみ

表-4 4種類の荷荷条件

荷荷条件	ピークひずみ 目標値 $10^{-6}$		ピークひずみ 実測平均値 $10^{-6}$		破断回数 (実験値) $N_e$		破断回数 (計算値) $N_c$
	引張	圧縮	引張	圧縮	各供試体	平均值	
1	10000	-25000	6335	-29235	30, 34, 37, 28, 29	31.6	33.6
2	10000	-50000	8302	-54549	11, 16, 16, 16, 13, 16, 17	15.0	16.0
3	20000	-35000	20742	-39942	14, 17, 17, 14, 13	15.0	16.0
4	30000	-25000	28798	-28160	16, 11, 13, 13, 14	13.4	17.1

表-5 振幅を変化させた実験の概要

パターン	荷荷条件の組合せ	破断回数 ラウンド-サイクル	累積損傷度	
			各供試体	平均值
A	3→1→4→2	6-2, 6-1, 5-3	1.09, 1.01, 0.94	1.01
B	4→1→3→2	5-1, 5-4, 5-4	0.90, 1.06, 1.06	1.00
C	4→3→1→2	6-1, 5-2, 6-2	1.08, 0.94, 1.14	1.05
D	3→1→2→4	4-4, 5-3, 5-3	0.82, 0.97, 0.97	0.92
E	4→3→2→1	5-4, 5-1, 6-1	1.03, 0.88, 1.09	1.00
F	1→4→3→2	5-1, 5-1, 4-4	0.85, 0.85, 0.82	0.84

ついて、ピーク圧縮ひずみ  $\epsilon_c$  を  $-30,000 \mu$ 、ピーク引張ひずみ  $\epsilon_t$  を  $20,000 \mu$  とした繰り返し荷荷を 2 サイクル与えた時の、鉄筋の平均応力～平均ひずみ関係を示したものであり、図-13は、鉄筋軸方向中央断面での座屈方向の最外縁における局所ひずみの計算値を示したものである。これらの結果は、1/d および繰り返し荷荷における平均ひずみを同一とした場合の、D19 に対する計算結果と全く同一であることが確かめられた。このことは、1/d が同一であれば、鉄筋直径にかかわらず、平均応力 (荷重/鉄筋断面積) と平均ひずみ (変形/固定長) の関係、および、平均応力と局所ひずみの関係が同一であることを意味するので、疲労破断が鉄筋の局所ひずみの履歴で定まるとすれば、基本的には直径が異なる鉄筋に対しても、式(2)の破壊条件が適用できるものと推察される。ただし、鉄筋のデフォーメーションの相違によって、ふし周辺における応力集中の程度が異なること、また、鉄筋の化学成分によって曲げ戻しに対する耐性が異なると言われていることなど、解析では考慮されていない要素もあるので、さらに実験的な検討を要することは言うまでもない。

#### 4. 変位振幅が変化する繰り返し荷荷を受ける異形鉄筋の破断

##### (1) 荷荷条件

地震時において、例えば、RC橋脚の軸方向鉄筋には、ランダムな大きさの強制変形 (ひずみ) が繰

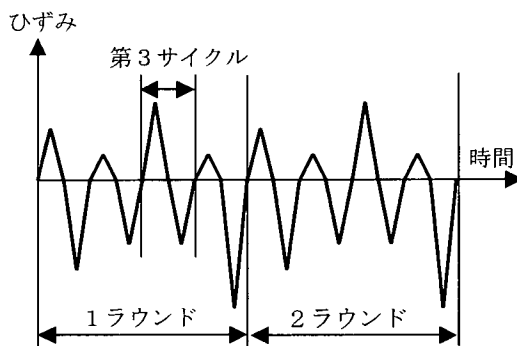


図-14 ひずみパターン

返し作用するので、それを近似的に模擬して、変位振幅が変化する強制変位を作用させる実験を行った。実験では、表-4に示すような、ピーク引張ひずみを  $10,000 \sim 30,000 \mu$ 、ピーク圧縮ひずみを  $-25,000 \sim -50,000 \mu$  とした4種の荷荷条件を組み合わせ用いた。それぞれ単一の条件で繰り返し荷荷した場合の破断回数は13~32回である。また、実測ひずみを用いて、式(2)で算定した破断回数  $N_c$  も表中に示した。破断回数の計算値は、条件4については実験値  $N_e$  よりも大きいのであるが、ほぼ実験値のばらつき範囲内に含まれており、推定精度に問題はないと思われる。

繰り返し荷荷実験では、これら4つの荷荷条件をランダムな順序で組み合わせさせた6つのパターンを用いた。各パターンにおける荷荷条件の組み合わせは表-5のとおりである。また、一例として、パター

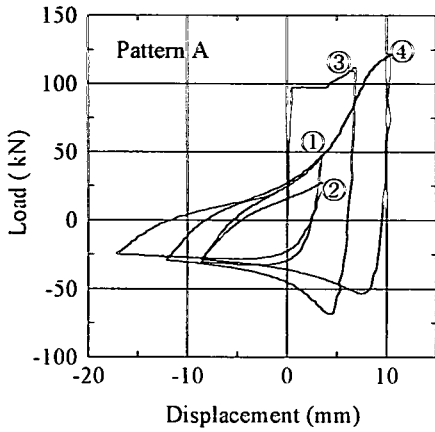


図-15 パターンA 第1ラウンド

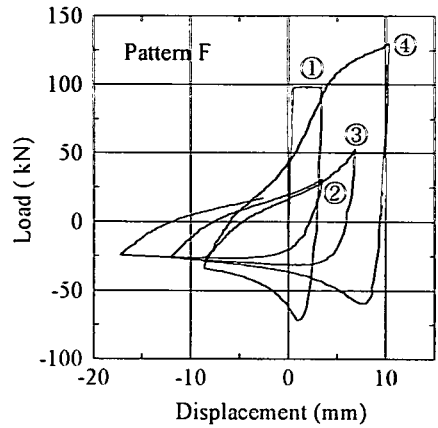


図-16 パターンF 第1ラウンド

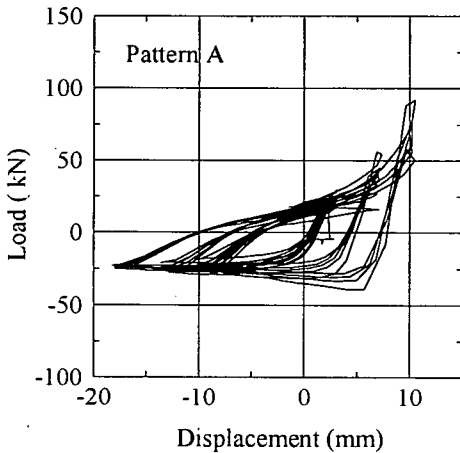


図-17 第2ラウンド以降 (A)

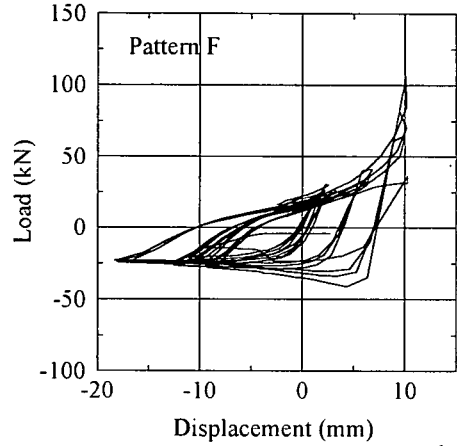


図-18 第2ラウンド以降 (F)

ンAのひずみ波形を図-14に示した。これ以後、4つの载荷条件の一巡を「ラウンド」と称し、1つの载荷条件による载荷を「サイクル」と称することとする。従って、1ラウンドは4サイクルからなる。

## (2) 破壊条件の検討

各パターンについてそれぞれ3体の供試体の実験を行った。鉄筋が破断した時点は表-5に併せて示したが、例えば、6-2とは6ラウンドの第2サイクルで破断したことを意味している。

振幅が変化する場合の疲労損傷に関しては、マイナー則が成立するかどうかを検討した。すなわち、一定ひずみ振幅  $\varepsilon_i$  における疲労寿命を  $N_i$  としたとき、 $\varepsilon_i$  の  $n_i$  回の繰り返しによる損傷は  $n_i/N_i$  であり、これをすべての  $\varepsilon_i$  について線形に加算した累積損傷度  $D$  が 1.0 となったときに疲労破壊する、という考え方である (式 (3) 参照)。

$$D = \sum (n_i/N_i) = 1.0 \quad (3)$$

各供試体の累積疲労損傷度  $D$  は表-5に示した。ここで、各载荷条件に対する疲労寿命  $N_i$  は、第1ラウンドにおける各サイクルのピークひずみの実測値を用いて、式 (2) によって算定した値を用いた。どのパターンにおいても、各供試体破断時の累積損傷度は 0.82 から 1.14 の範囲にあり、平均的にも 1.0 に近い値であり、マイナー則が良い精度で成立することが確認された。

図-15および16は、パターンAおよびFの実験における第1ラウンドの荷重～軸方向変形を示したものであり、図中の数字は载荷条件である。载荷条件の組合せ順序が変わると、特に引張変形域における荷重～変形関係はかなり異なっており、破壊条件に影響を及ぼすのではないかと予測も生ずるの



であるが、図-17および18で明らかのように、第2ラウンド以降における荷重～変形関係は、載荷パターンにかかわらずほぼ同様になる。このような理由で疲労寿命はパターンによらず一定になるものと考えられるが、大変興味深い結果である。

## 5. 結論

両端を固定した異形鉄筋 D19 が、引張側では降伏し、圧縮側では座屈するような大变位の繰り返しにより、低サイクル疲労破断する場合の破壊条件について、主として実験的に検討を行った。

鉄筋のデフォーメーションの影響や、材質の影響など、さらに検討を要する問題も残されているが、本研究で得られた主な結論をとりまとめると以下のとおりである。

(1) 塑性域、座屈域での鉄筋の変形を計測する方法として、鋼リングと鋼ワイヤーを用いる方法を開発し、その有効性を確認した。

(2) 鉄筋の疲労破壊条件を、鉄筋固定長と鉄筋直径の比 ( $l/d$ )、および、ピーク変位時の平均ひずみ ( $\epsilon_u$ ,  $\epsilon_c$ ) の関数として示した。有限要素法による解析の結果、 $l/d$  を一定とすれば、平均応力と平均ひずみの関係、および、平均応力と破壊断面の局所ひずみの関係は、鉄筋直径によらず同一であることが確かめ

られたので、この破壊条件は直径の異なる鉄筋にも適用できるものと推測される。

(3) 変位振幅が変化するような繰り返し載荷を受ける場合の疲労損傷に関しては、マイナー則が適用できることが確かめられた。

**謝辞：**本研究の実験は、当時本学の大学院生、卒業生であった、雨宮明人、前田 忍、小林宏崇、手塚公宏、松山昌史の各氏が実施したものである。ここに謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) [平成8年制定]コンクリート標準示方書、耐震設計編、土木学会。
- 2) 福浦尚之、前川宏一：RC非線形解析に用いる鉄筋の繰り返し履歴モデル、土木学会論文集、No. 564/V-35, pp. 291-295, 1997.
- 3) 田上和也、中村 光、斎藤成彦、桧貝 勇：繰り返し荷重を受ける鉄筋の座屈モデルに関する研究、構造工学論文集、Vol. 47A, pp. 725-734, 2001.

(2003. 3. 31 受付)

## FATIGUE FAILURE CRITERION OF DEFORMED BARS SUBJECTED TO LARGE DEFORMATION IN PLASTIC REGION AND BUCKLING REGION

Takeshi HIGAI, Hikaru NAKAMURA and Shigehiko SAITO

After the Hanshin-Awaji earthquake, large amount of lateral reinforcement is commonly used to improve seismic performance of the RC structures. Although large amount of and closely spaced lateral reinforcement will be effective to prevent elastic buckling of the axial reinforcement, it can hardly prevent plastic buckling. Therefore, under strong earthquake, axial reinforcement will be subjected to the repeated loading of large deformation reversals ranging from tensile plastic region to compressive buckling region. The authors carried out low cycle fatigue test of deformed bars, and examined the failure criterion of them.