

## 2章 鉄筋の低サイクル疲労実験

### 2.1 実験概要

本章ではSD345、SD490、USD685の鉄筋別について、それぞれ、鉄筋の繰り返し荷重載荷を行い、鉄筋強度の違いによる低サイクル疲労の影響の把握を行うことを目的とする。低サイクル疲労実験供試体の作成方法及び実験方法は既往の実験方法<sup>1)</sup>を参考にする。

#### (1) 健全な鉄筋の繰り返し載荷実験

##### ① 検討手法

既往の低サイクル疲労実験<sup>1)</sup>を参考に、正負交番載荷実験で使用する主筋D13を対象にして図2.1.1の載荷装置により検討する。固定長は $10d$  ( $d$ は鉄筋径)とし、鉄筋に標点間ひずみ $\epsilon_x$ を与えた後、ひずみ0まで変位量に戻すサイクルを鉄筋破断まで繰り返す。なお、ひずみは実験体の鉛直変位量を固定間長で除した値により評価する。

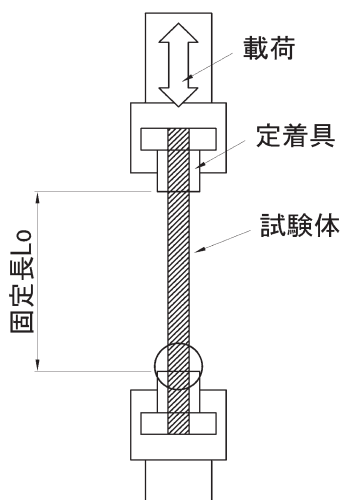


図 2.1.1 載荷装置模式図

##### ② 載荷方法

標点間ひずみごとに3回繰り返しの漸増変位の載荷パターンを与える。 $\epsilon_x$ は、 $\epsilon_1$ を鉄筋の降伏ひずみ程度を与え、 $\epsilon_2$ 以降は、4章にて後述するRC柱の実験体の正負交番載荷実験で供試体降伏時の軸方向鉄筋が受けるひずみ履歴を参考に設定し表2.1.1のとおりとする。 $\epsilon_x$ を固定間ひずみとして3サイクル載荷し、漸増させる方法とする<sup>1)</sup>。各強度の鉄筋について3本ずつ実施する。

表 2.1.1 付与する引張ひずみ

$\epsilon_x$	引張ひずみ (マイクロ)
$\epsilon_1$	3,000
$\epsilon_2$	10,000
$\epsilon_3$	17,000
$\epsilon_4$	24,000
$\epsilon_5$	31,000
$\epsilon_6$	38,000
$\epsilon_7$	45,000
$\epsilon_8$	52,000

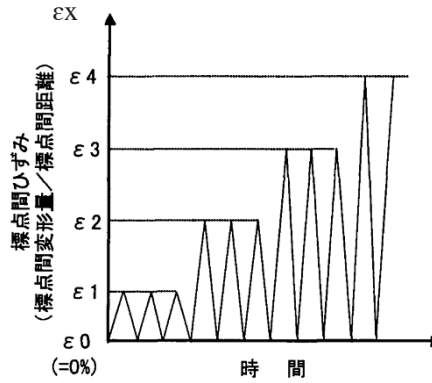


図 2.1.2 载荷パターン

③ 载荷速度

4章に示すRC柱の正負交番载荷実験における軸方向鉄筋のひずみ速度 ( $\mu/\text{sec}$ ) の計測結果 (表 2.1.2) を参考に载荷速度を設定する。今回の実験では特に USD685 の疲労特性に着目して、C-1 および C-2 のひずみ速度の平均値程度を想定し、降伏前のひずみ速度は  $800 \mu/\text{sec}$  程度、降伏後は  $5000 \mu/\text{sec}$  を採用する。また、4章に示すRC柱の正負交番载荷実験の結果から、鉄筋破断はひずみが降伏ひずみ (SD490 では  $3000 \mu$ 、USD685 では  $3600 \mu$ ) を超過してから、 $10000 \sim 12000 \mu$  程度に急増するまでの間で生じている。このことから、鉄筋破断まで漸増载荷させるものとする。表 2.1.3 に载荷速度と载荷時間の目安を整理する。

表 2.1.2 ひずみ速度 ( $\mu/\text{sec}$ )

	1 $\delta_0$	2 $\delta_0$	3 $\delta_0$
C-1	780 (降伏前)	820 (降伏前)	630 (降伏前) → 9300 (降伏後)
C-2	820 (降伏前)	1000 (降伏前) → 3000 (降伏後)	2300 (降伏後)

なお、 $\delta_0$  は、4章における正負交番载荷実験における基準変位であり、本実験前に行う計算上の降伏変位までの予備载荷実験から実際に計測された降伏変位から設定した変位量である。今回の実験では  $\delta_0 = 25.9 \text{ (mm)}$  としている。

表 2.1.3 荷重速度及び荷重時間

$\epsilon_x$	ひずみ ( $\mu$ )	のび量 mm	速度 $\mu$ /sec	荷重時間 (0～ピーク)
$\epsilon_1$	3000 $\mu$	0.39	800	3 秒
$\epsilon_2$	10000 $\mu$	1.3	5000	2 秒
$\epsilon_3$	17000 $\mu$	2.2	5000	3.4 秒
$\epsilon_4$	24000 $\mu$	3.1	5000	4.8 秒
$\epsilon_5$	31000 $\mu$	4.0	5000	6.2 秒
$\epsilon_6$	38000 $\mu$	4.9	5000	7.5 秒
$\epsilon_7$	45000 $\mu$	5.9	5000	9.1 秒

## (2) 屈曲鉄筋の繰り返し荷重実験

### ① 検討手法

予め折り曲げた鉄筋の引張～座屈～引張～座屈の繰り返し荷重実験を実施し、鉄筋強度の違いによる塑性ひずみレベルにおける繰り返し曲げ延ばし特性を把握する。屈曲部分にひずみゲージを貼り付けひずみを計測する。荷重パターンは図 2.1.4 の通りである。



図 2.1.3 荷重パターン図

屈曲鉄筋を直線形になるまで引張ると、次に圧縮した際に、初期の屈曲部と同じ位置で屈曲しない懸念がある。本実験では、特定の位置で鉄筋が曲げ延ばしを繰り返す際の特徴を把握することが目的のため、図中に示すように角度 $\beta$ まで引張り、元に戻す工程を繰り返すこととする。角度 $\beta$ は極力 180 度に近く、かつ押し戻した際に、初期の屈曲部で再屈曲が生じる角度とする。これは、試運転により 120 度と 150 度の 2 ケースを実施して、決定する。

### ② 加工形状

初期の曲げ角度は、同じ部位で屈曲が繰り返されるよう比較的小さな角度とするともに、初期状態で塑性化が著しくならないよう 90 度とする。曲げ半径は、機械的性質上大きな問題が無い範囲で極力小さくするものとし、USD685 の規格値 (内側半径=2d、中心半径で 32.5mm) を採用する。加工形状は、加工作業の物理的な制約から決定した (写真 2.1.1)。

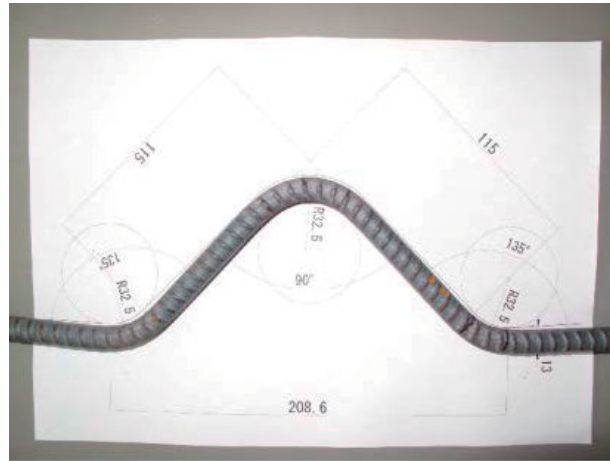


写真 2.1.1 屈曲鉄筋加工形状

$\beta = 120$ 度・ $150$ 度になるように引張りを与えた状態の寸法は図 2.1.5 のとおりである。

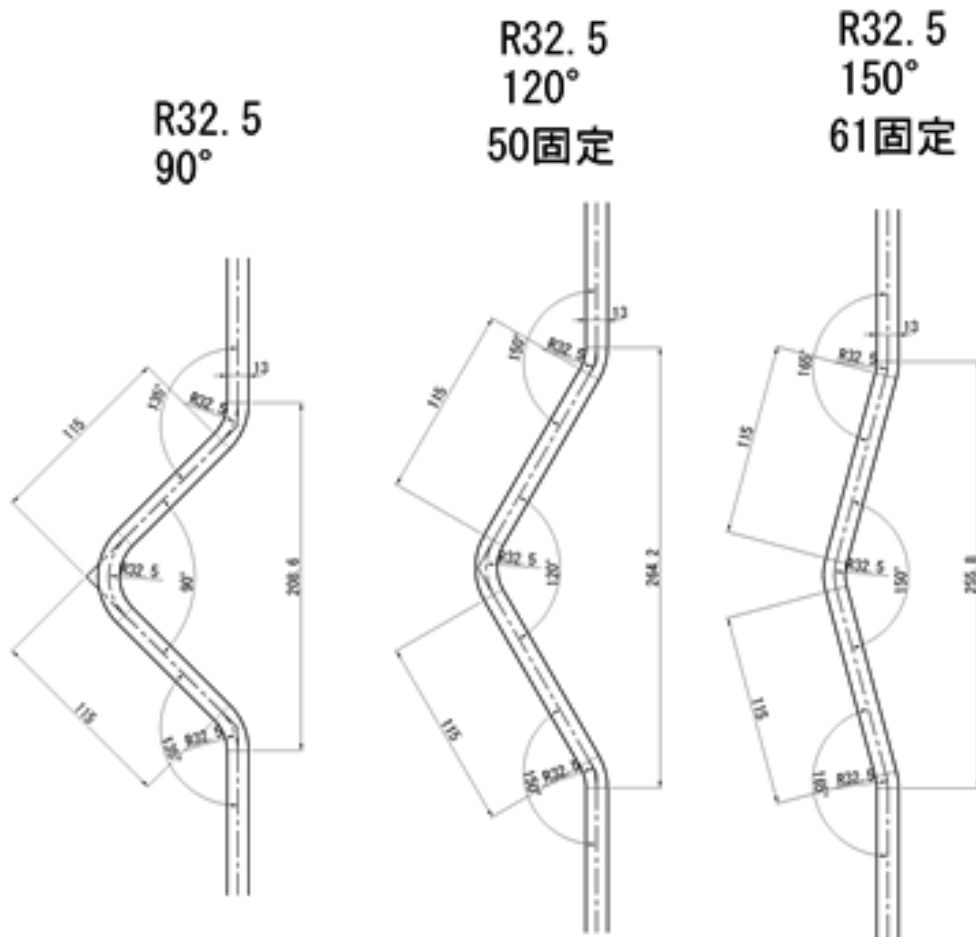


図 2.1.4 加工寸法図

### ③ 載荷周期

載荷周期は、4章のRC柱の正負交番載荷実験において、かぶりコンクリートが剥落した以降の鉄筋の伸び～座屈のサイクルの観察結果や実験機の能力も勘案し、40秒（引張20秒+圧縮20秒）とした。

## 2.2 実験結果と考察

本研究における低サイクル疲労実験を、健全な鉄筋の繰り返し載荷実験をCASE1とし、屈曲鉄筋の繰り返し載荷実験をCASE2として、SD345、SD490、USD685の3種類の鉄筋について3本ずつ行った実験結果を以下に示す。

### 2.2.1 繰り返し回数とひずみの関係

$\epsilon_x$  まで引張ひずみを与えひずみ0まで戻す過程を1繰り返し回数として、CASE1における、破断までの平均繰り返し回数は31.7回（SD345）、25.0回（SD490）、25.0回（USD685）であった。3本の鉄筋がそれぞれ破断した時点でのひずみの加算平均を破断時の平均ひずみとして整理したところ、72356 $\mu$ （SD345）、55038 $\mu$ （SD490）、54327 $\mu$ （USD685）となった。

CASE2については、鉄筋破断まで繰り返し載荷した回数を実験体ごとに棒グラフで整理した。（図2.1.1）

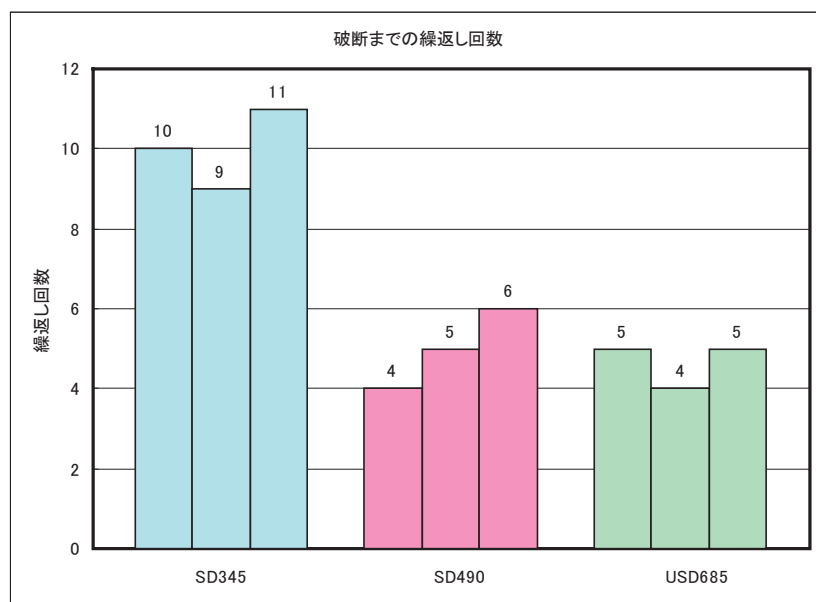


図 2.2.1 破断までの繰り返し回数 (CASE2)

また、両ケースにおける座屈および破断時の繰り返し回数とひずみ（CASE2は破断時の繰り返し回数のみ）の結果を表2.2.1、表2.2.2に示す。本実験においては、SD490、

USD685 は SD345 に比べ破断までの繰返し载荷回数、破断時のひずみともに小さいことから、SD490、USD685 は SD345 に比べ脆性的な性質を示していると考えられる。

表 2.2.1 CASE1 における破断時の繰返し回数とひずみ

				破断			
				サイクル	回数 (回目)	引張 /圧縮	平均ひずみ ( $\mu$ )
CASE 1	SD345	①	@7000	$\varepsilon$ 11	1	引張	73,000
		②	@7000	$\varepsilon$ 11	3	引張	73,000
		③	@7000	$\varepsilon$ 11	1	引張	73,000
	SD490	①	@7000	$\varepsilon$ 8	3	引張	52,000
		②	@7000	$\varepsilon$ 9	2	引張	59,000
		③	@7000	$\varepsilon$ 9	1	引張	59,000
	USD685	①	@7000	$\varepsilon$ 8	3	引張	52,000
		②	@7000	$\varepsilon$ 9	2	引張	59,000
		③	@7000	$\varepsilon$ 9	1	引張	59,000

表 2.2.2 CASE2 における破断時の繰返し回数とひずみ

			回数 (回目)	破断状況
CASE 2	SD345	①	10	引張で内側亀裂 圧縮で破断
		②	9	引張で破断
		③	11	引張で破断
	SD490	①	4	引張で絞り 圧縮で破断
		②	5	引張で破断
		③	5 6	圧縮で外側亀裂 引張で破断
	USD685	①	5	引張で絞り
		②	4	引張で破断
		③	5	引張で破断

## 2.2.2 鉄筋の荷重-変位曲線

鉄筋の荷重-変位履歴曲線について材質による違いを確認する。

健全な鉄筋の繰返し载荷実験 CASE1 において、各鉄筋の 1 本目の荷重-変位曲線を、CASE1①とし、繰返しサイクルごとに示す。

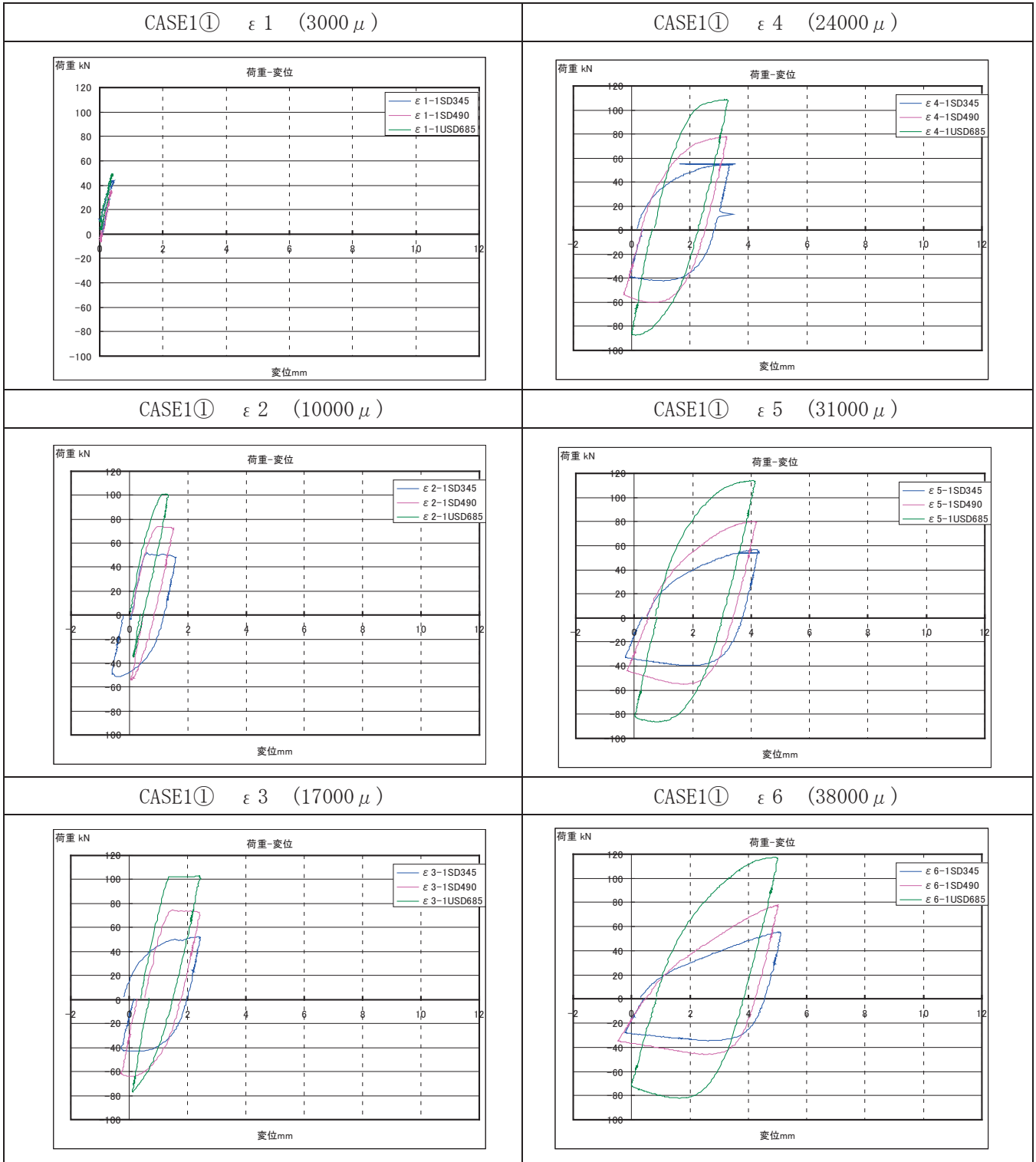


図 2.2.2 CASE1①に関する荷重-変位曲線(ε 1 ~ ε 6)

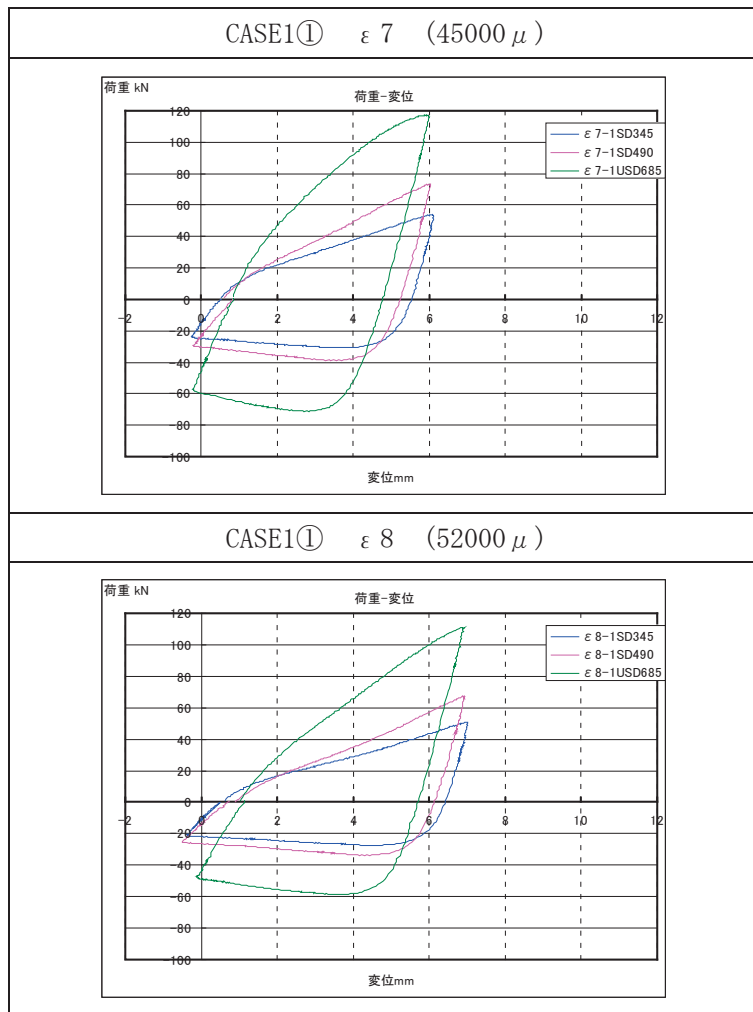
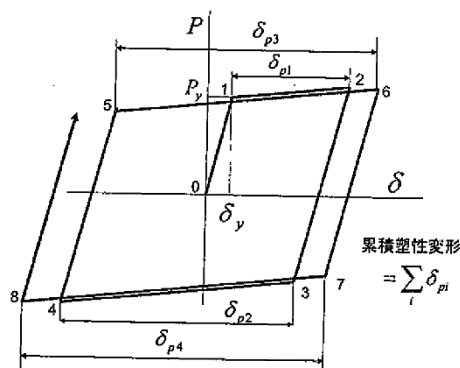


図 2.2.3 荷重-変位曲線 ( $\epsilon 7 \sim \epsilon 8$ )

降伏点の違いにより履歴曲線は異なる。圧縮域での履歴曲線は、高強度鉄筋（特に USD685）は、SD345 に比べ少し痩せた曲線になっている。



低サイクル疲労に対する照査方法として累積塑性変形倍率を一指標として用いられている。既往研究では、例えば弾塑性ダンパーなどが地震動に対してエネルギー吸収する能力を評価する指標として累積塑性変形倍率に着目したものがある<sup>2)3)</sup>。これは、荷重-変位履歴曲線の内、塑性変形量の累積した値を降伏変位量で除した値である。低サイクル疲労に対する簡易的な評価手法としてたとえば、**図 2.2.4**における累積塑性変形量が提案されており次式で表される<sup>4)</sup>。



$\delta_{pi}$ :  $i$  番目の  $P$ (kN) による塑性変形量(mm)

図 2.2.4 累積塑性変形量概要図

本研究では累積塑性変形量(図 2.2.4)を CASE1 の各鉄筋種別について算出した(表 2.2.4)。

表 2.2.4 累積塑性変形量 (各サイクル別)

	SD345	SD490	USD685
$\varepsilon 1$	-	-	-
$\varepsilon 2$	4.7	2.0	0.2
$\varepsilon 3$	8.2	5.0	2.5
$\varepsilon 4$	13.5	10.5	8.3
$\varepsilon 5$	19.7	16.0	12.6
$\varepsilon 6$	25.0	21.3	19.8
$\varepsilon 7$	31.1	27.0	26.7
$\varepsilon 8$	36.3	28.2	27.1
$\varepsilon 9$	41.4	-	-
$\varepsilon 10$	47.3	-	-
$\varepsilon 11$	7.9	-	-
合計	235.1	110.0	97.2

(mm)

2.2.1 や図 2.2.4 の整理の結果、SD490、USD685 は破断までの载荷繰り返し回数が SD345 と比較して少ないことが確認されていることに加えて、破断までの累積塑性変形量も比較的小さいことが確認できる。

### 2.2.3 累積ひずみ

7000 $\mu$  サイクルで载荷した健全な鉄筋の繰り返し载荷実験 CASE1 について、鉄筋の破断までの  $\epsilon_i$  毎にプロットした応力-ひずみ関係を以下に示す。また、鉄筋の引張強度実験結果もあわせて表記する。

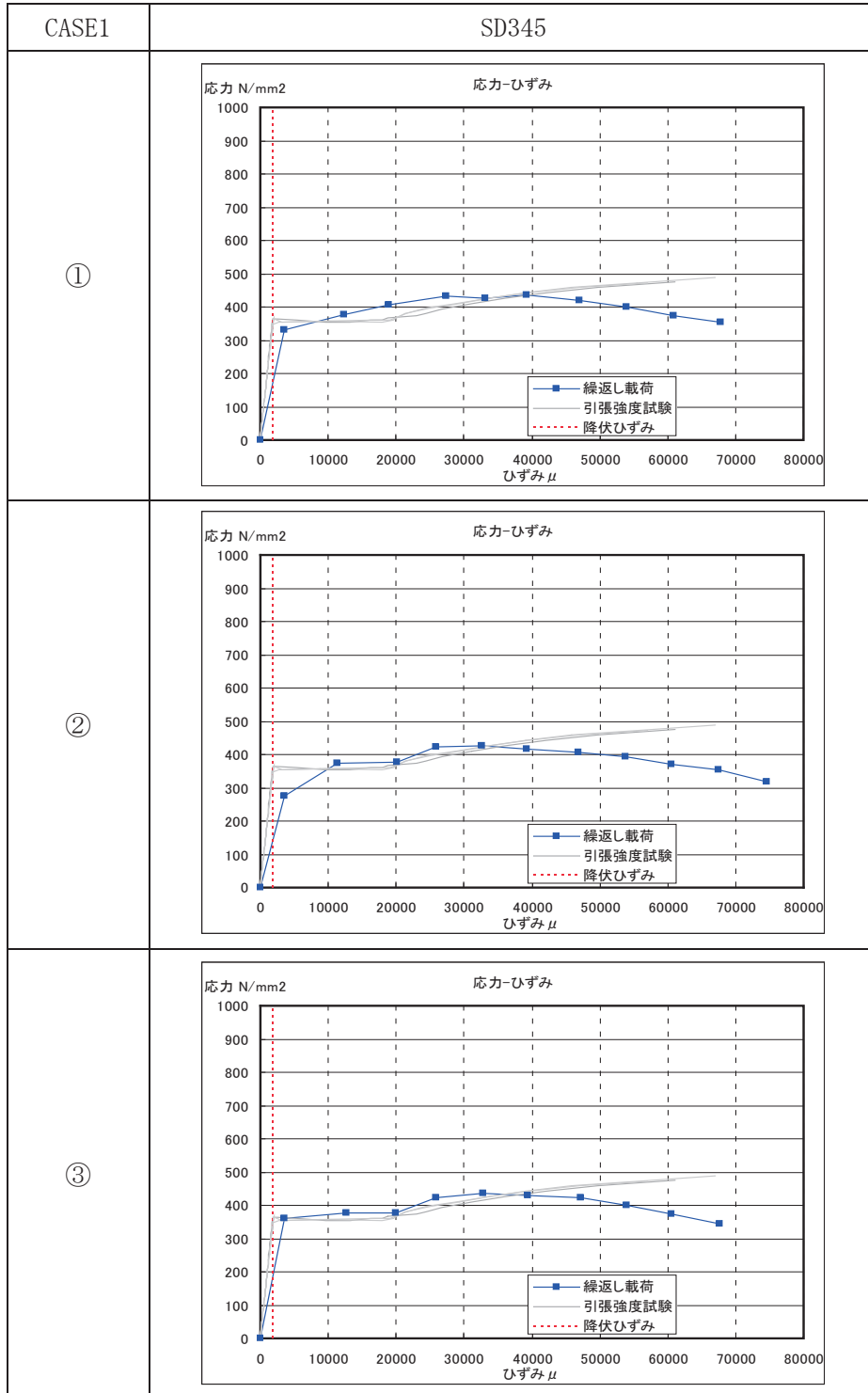


図 2.2.6 鉄筋破断までの応力-ひずみ曲線 (CASE1 SD345)

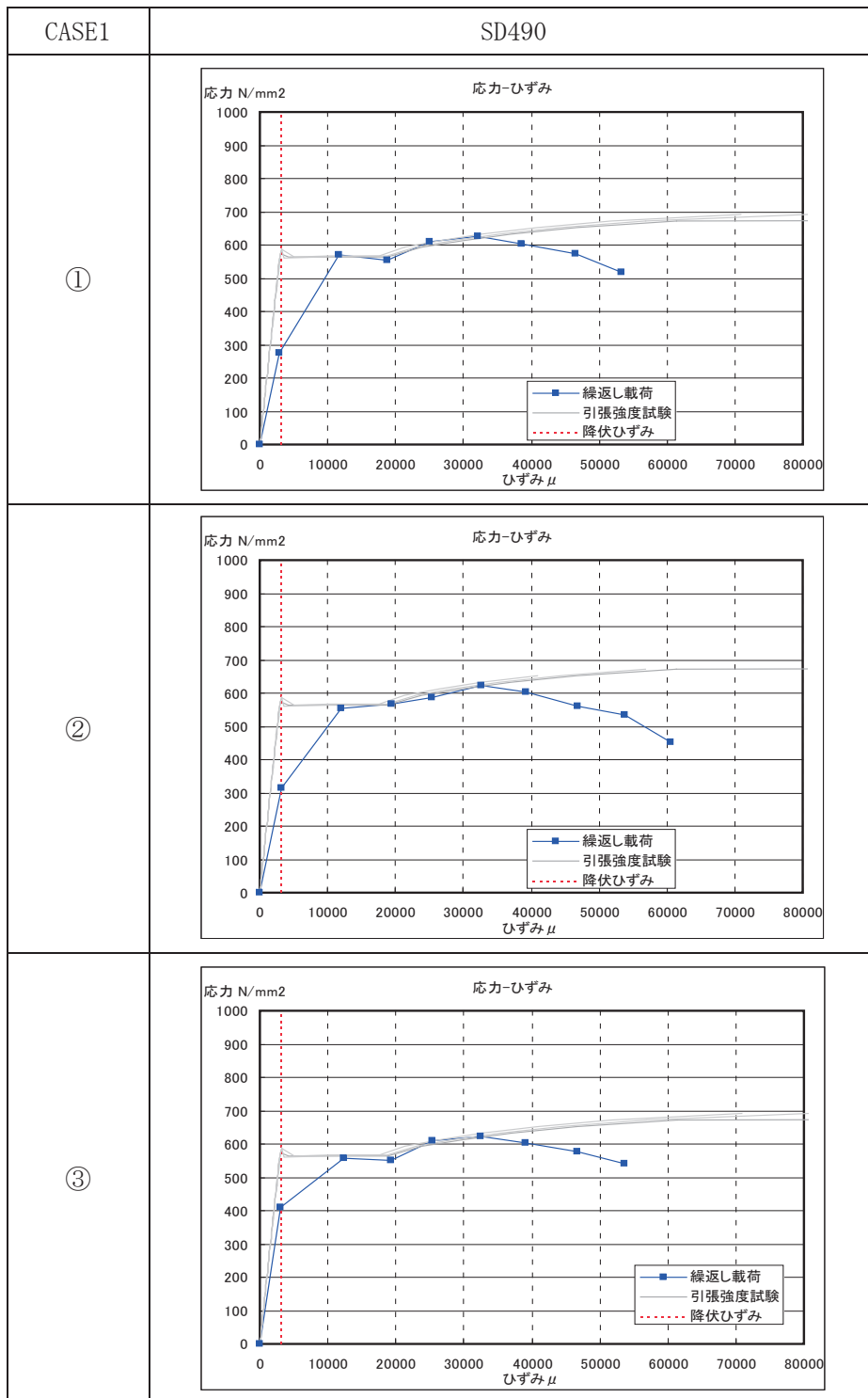


図 2. 2. 7 鉄筋破断までの応力-ひずみ曲線 (CASE1 SD490)

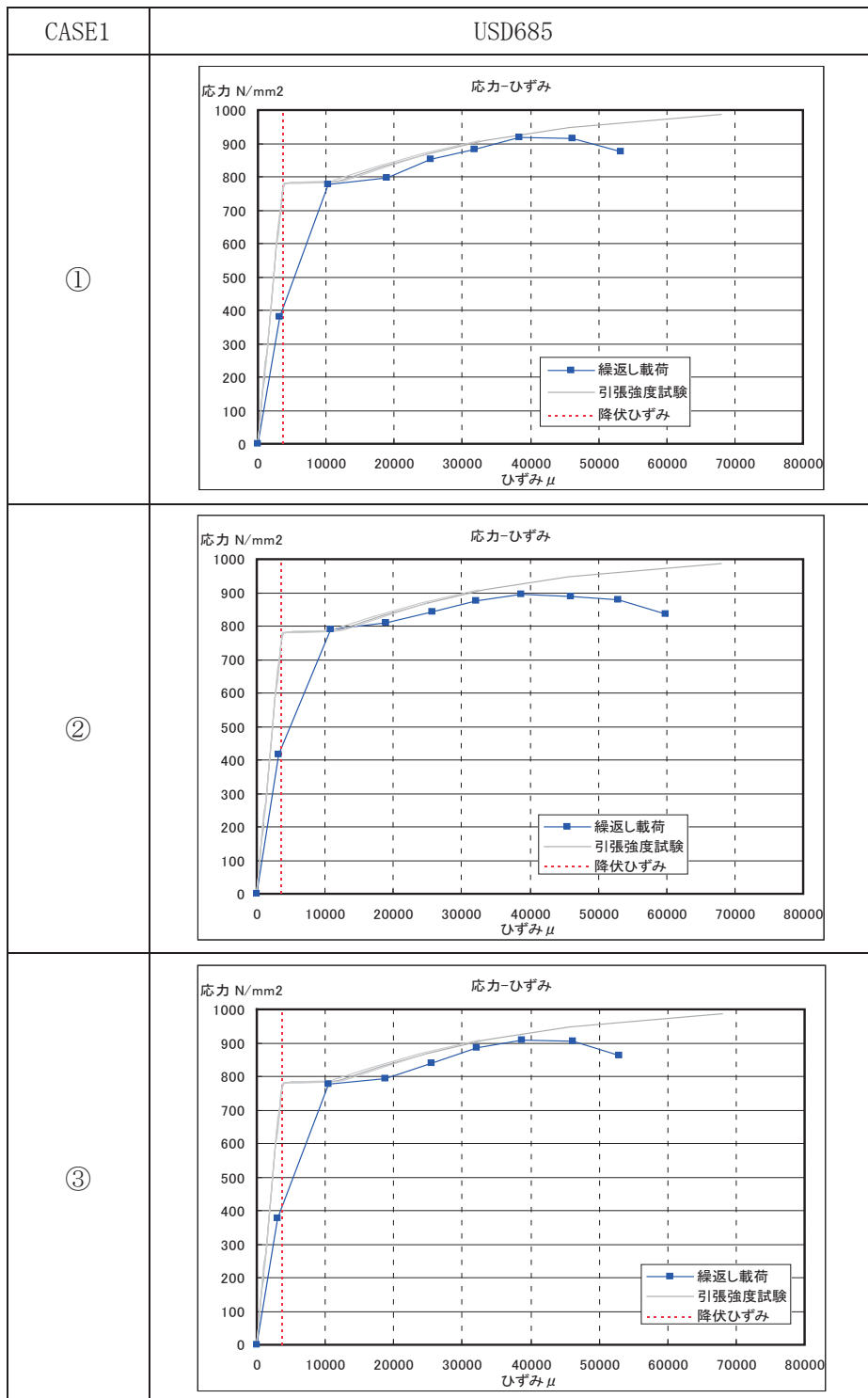


図 2.2.8 鉄筋破断までの応力-ひずみ曲線 (CASE1 USD685)

各実験体とも鉄筋の降伏ひずみに達した後、応力低下時まで概ね鉄筋の引張強度実験結果の応力 - ひずみ曲線上をたどる。引張強度実験結果と初期剛性に違いがみられるが、ゲージで測定したひずみと標点間ひずみ（平均ひずみ）の違いと考える。

CASE1 においては各実験体ともにひずみが  $30000\mu \sim 40000\mu$  に達した後、応力の低下が始まる。応力低下後、破断までのひずみは材質により異なる。

SD345 は  $70000\mu \sim 80000\mu$  で破断しているのに対し、SD490 は  $50000\mu \sim 60000\mu$ 、USD685 は  $50000\mu \sim 60000\mu$  である。

最大引張応力時のひずみ  $\varepsilon a$  と破断時のひずみ  $\varepsilon b$  の比率  $((\varepsilon b - \varepsilon a) / \varepsilon a)$  は、SD345 が 1.7~2.2、SD490 が 1.6~2.0、USD685 は 1.3~1.5 であることから、粘り強さは SD345 > SD490 > USD685 と考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 浅井洋、春日昭夫、飯田字朗、梅原秀哲：SD490 鉄筋を軸方向鉄筋に用いた RC 橋脚の実用化に関する研究、土木学会論文集, No. 760, V-63, pp91-108, 2004. 5
- 2) 木村祥裕：局部座屈崩壊型 H 形鋼梁の塑性変形性能と累積塑性変形性能に及ぼす荷履歴特性の影響、日本建築学会構造系論文集、Vol. 76, No. 664, pp1143-1151, 2011. 6
- 3) 伊藤浩資、笠井和彦：弾塑性ダンパーをもつ制震構造の最大変形に基づくダンパーの累積塑性変形評価、日本建築学会構造論文集, No. 607, pp53-61, 2006. 9
- 4) 宇佐美勉：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン、技報堂出版、2006. 9