

# 論文 曲げ降伏後せん断破壊する鉄筋コンクリート梁部材の破壊性状におよぼす動的載荷の影響

金子 貴司<sup>\*1</sup>・塩原 等<sup>\*2</sup>・小谷 俊介<sup>\*3</sup>

要旨：地震時には、建築物は歪速度の影響を受けて設計時に意図した崩壊形を形成しない場合もある。そこで、鉄筋コンクリート片持ち梁の動的繰返し漸増振幅載荷実験を行ない鉄筋引張、補強筋比、載荷速度が、耐力、破壊モード、降伏後のせん断破壊の発生におよぼす影響を検討した。載荷速度による鉄筋の降伏強度の上昇を考慮した断面精算により、降伏時せん断力の上昇を説明できる。また、降伏後の耐力の低下は、軸歪の増加が無くなると始まることを示した。

キーワード：鉄筋コンクリート、梁、曲げ降伏、せん断破壊、動的載荷、歪速度

## 1. はじめに

近年、歪速度の上昇に伴う強度上昇などの動的な材料特性が定量化されつつあるが、鉄筋コンクリート部材に及ぼす変形速度の影響については、研究者間でその評価は必ずしも同じでなく不明な点が多い。例えば文献 1 や 2 など。本研究は、アクチュエータにより全 8 体の RC 梁部材の動的載荷実験を行ない、載荷速度が耐力、変形および破壊性状に及ぼす影響を検討することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

既往の研究より、鉄筋コンクリート部材においても、歪速度の影響を受け、降伏強度及び剛性が上昇する事が知られている。部材の曲げ強度が載荷速度によって上昇する場合、それに伴って増加するせん断力または付着応力のため部材が脆性的な破壊を起こす可能性がある。

そこで、全 8 体の RC 梁の動的および静的載荷実験を行った。試験体は、全て同一形状であり、同時に作製した。試験体は、断面が

200mm×300mm、せん断スパンが 750mm の片持ち梁で、試験体を固定するスタブを有する。試験体の諸元・配筋を表-1 に、形状および配筋を図-1 に示す。梁主筋は、梁端で厚さ 22mm の鉄板に溶接した。実験は、引張鉄筋比を 3 種類とし、1 対の試験体について載荷速度を変えて実験した。

鉄筋およびコンクリートの材料特性を表-2、表-3 に示す。補強筋として使用した  $\phi 4$  の鋼

表-1 試験体の諸元・配筋

試験体	S 1 D 1	S 2 D 2	S 3 D 3	S 4 D 4
主筋	2-D16	3-D16	4-D16	3-D16
鉄筋比[%]	0.74	1.10	1.47	1.10
補強筋	$\phi 4@60$			$\phi 4@40$
補強筋比[%]	0.21			0.32

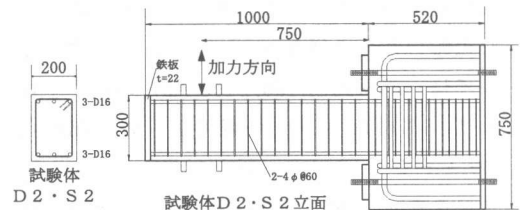


図-1 試験体の形状および配筋 単位：mm

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 東京大学助教授 大学院工学系研究科建築学専攻 工博 (正会員)

\*3 東京大学教授 大学院工学系研究科建築学専攻 Ph.D 工博 (正会員)

材の降伏点は 0.2% オフセットにより求めた。

試験体の曲げ、せん断および付着強度の算定は、日本建築学会刊行の「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」<sup>3)</sup> によった。試験体はすべて曲げ降伏先行型とした。各試験体の諸強度計算値及び、曲げ降伏時の入力せん断力と部材のせん断強度が等しくなる時のヒンジ回転角を表-4 に示す。

## 2.2 加力方法

加力装置を図-2 に示す。試験体は梁部材が鉛直になるよう 90 度回転させて反力床に固定する。梁端の加力点に対して、アクチュエータを用いて正負繰返し载荷を行った。アクチュエータは、最大加振力 ±200kN、最大振幅 ±200mm、最大速度 500mm/sec の能力がある。実験の変位制御は、アクチュエータのストローク量で行った。

## 2.3 载荷履歴

加力履歴を図-3 に示す。加力は、配筋が同一な一対の試験体に対して、試験体 D 1, D 2, D 3, D 4 では载荷速度 150mm/sec(動的载荷)とし、試験体 S 1, S 2, S 3, S 4 では 0.150mm/sec(静的载荷)として、実験を行なった。

振幅の部材角を 1/1000, 1/800, 1/400, 1/200, 1/150, 1/100, 1/67, 1/50, 1/40, 1/33, 1/20 と漸増させ、各 3 回ずつ繰返した。更に、各载荷の後に大変形経験後の小変形での状態を見るために小さな振幅の载荷を行なった。なお、試験体 D 4, S 4 では、部材角 1/150, 1/100, 1/67 の载荷を行わず、部材角 1/200 の载荷終了後、部材角 1/200 を再び 3 サイクル行なった直後、アクチュエータを止めず、部材角 1/20 を半サイクル载荷した。

動的载荷では、各载荷間に 3 分間の間隔を置き、ひび割れ観察を行った。静的载荷では、全ての载荷を連続して行った。

## 2.4 測定方法

梁端に加える水平力をロードセルにより、梁の加力点でのたわみを可視光型レーザ変位計により、梁のつけ根部分の変形をパイ型変位計および高感度変位計により、また、梁主筋およびあばら筋の歪度を歪ゲージにより測定した。

表-2 鋼材の材料特性

種別	降伏点 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	弾性係数 [GPa]
φ 4 SN400	487	514	204
D16 SD345	390	587	207

表-3 コンクリートの材料特性

材令 [日]	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	弾性係数 [GPa]
31	24.6	2.79	25.8
54	27.1	2.94	26.2
108	30.2	3.10	24.4

表-4 せん断強度計算値と塑性回転角

試験体	S 1	S 2	S 3	S 4
	D 1	D 2	D 3	D 4
曲げ降伏せん断力 <sup>*1</sup> [kN]	50.7	74.9	99.0	75.0
せん断終局強度 <sup>*2</sup> [kN]	89.5	94.2	97.9	103
せん断終局強度 <sup>*3</sup> [kN]	137	137	137	169
塑性回転角 <sup>*4</sup>	1/30	1/41	1/60	1/33

\*1 梁の断面精算によって求めた \*2 荒川 mean 式による \*3 靱性保証型指針による \*4 靱性保証型指針におけるせん断終局強度が曲げ降伏強度と等しくなる時の回転角

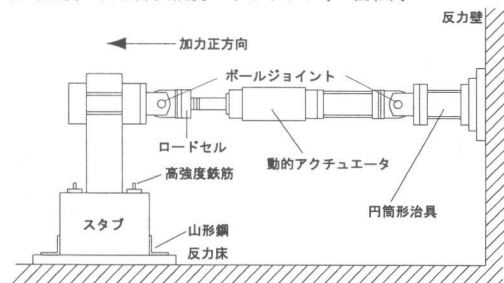


図-2 加力装置

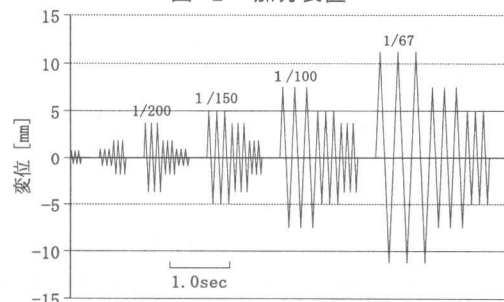


図-3 加力履歴

データの取込みには、PC 及びデジタル動ひずみ測定器を用い、サンプリング速度は、動的載荷では 0.005sec、静的載荷では 2.0sec とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況

8体の試験体のうち、試験体D2およびS2の破壊状況を以下に詳細に述べ、ひび割れの進展状況を写真-1に示す。

試験体D2は、部材角 1/400 の載荷において危険断面に曲げひび割れが、部材角 1/150 の載荷においてせん断ひび割れが発生した。部材角 1/67 の載荷において、耐力が頭打ちとなり、主筋の降伏が見られた。その後の載荷で、付着割裂ひび割れが生じ、繰返しによる耐力の低下が著しくなった。最終載荷では被りコンクリートが剥離し、あばら筋が破断するか、端部の135度フックが伸び開き、せん断引張破壊した。

試験体S2では、試験体D2と同様、危険断面に曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生し、部材角 1/67 の載荷で主筋の降伏が見られた後、付着割裂ひび割れが生じ、せん断引張破壊した。

このように、一組の対応する試験体では破壊性状は同様だが、試験体D2はS2に比べ、せん断ひび割れの発生位置が危険断面に近づき、被りコンクリートの剥落も広い範囲で生じた。

試験体D1とS1も同様な曲げ降伏後、塑性率 3.5 程度でせん断引張破壊した。試験体D3とS3では曲げ降伏せずにせん断引張破壊に至った。試験体D4とS4は、曲げ降伏後、部材角 1/20 まで載荷したが、せん断破壊に至らなかった。しかし、動的載荷試験体では、危険断面により近い位置にせん断ひび割れが発生した。

#### 3.2 せん断力-全体変形関係

各試験体の諸耐力などを表-5に、入力せん断力-全体変形関係を図-5に示す。主筋量が増大するとともに、破壊モードが曲げ降伏からせん断破壊へ移行することは、動的実験と静的実験に共通している。履歴特性はループ面積の

小さい逆S字形で、せん断破壊が生じると、繰返しによる耐力低下とループ面積の減少が著しかった。これは、主筋の本数の多い試験体ほど顕著であった。また、試験体D2、S2、D4、S4は同じ引張鉄筋比であるにもかかわらず、降伏強度は大きく異なっており、繰返し載荷により影響を受けたことを示している。

せん断耐力は、荒川式によるせん断強度計算値より高く、靱性保証型指針よりも小さかった。

動的載荷した試験体の曲げ降伏時せん断力は、静的載荷に比べて、試験体D1で 17.7%、試験体D2で 20.1%、D4で 13.9%上昇した。

曲げ降伏せずにせん断破壊した試験体D3では、試験体S3に比べ、最大せん断力は 8.1%上昇した。これらが曲げ降伏に先行してせん断破壊に至った理由は、歪速度の影響で曲げ耐力が上昇して入力せん断力が増大したためである。

図-4に、1/100の載荷における等価粘性減衰定数を示す。1/150、1/200の載荷では動的載荷、静的載荷ともほぼ同じ値になっている。従って、大変形経験後の小変形におけるエネルギー吸収能に差は見られない。

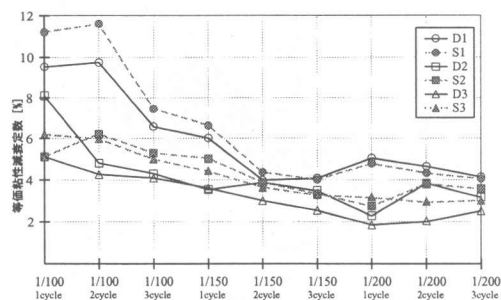
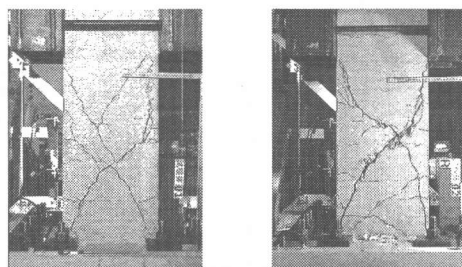


図-4 1/100の載荷の等価粘性減衰



動的載荷

静的載荷

写真-1 破壊状況 (部材角 1/67 載荷終了時)

表-5 実験結果

試験体	D 1	D 2	D 3	D 4	S 1	S 2	S 3	S 4
弾性剛性 <sup>*1</sup> [kN/mm]	28.9	36.0	43.1	27.3	34.9	45.8	44.9	49.3
降伏時せん断力 <sup>*2</sup> [kN]	63.1	87.0	—	92.9	53.4	72.4	—	81.5
降伏点変位 [mm]	6.27	6.88	8.44	5.78	5.11	6.42	8.63	6.48
最大せん断力 [kN]	63.1	87.7	104	99.0	55.3	73.1	96.4	85.5
最終部材角 <sup>*3</sup> [rad]	1/34	1/52	1/52	—	1/40	1/51	1/43	—
塑性率	3.40	1.94	1.55	—	3.57	2.07	1.92	—
破壊モード	曲げ降伏後せん断破壊	曲げ降伏後せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後載荷終了	曲げ降伏後せん断破壊	曲げ降伏後せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後載荷終了

\*1 弾性域における荷重-変形関係の近似直線 \*2 主筋が降伏した時の入力せん断力 \*3 耐力が曲げ降伏強度（試験体D 3, S 3では最大せん断力）の80%に低下した点

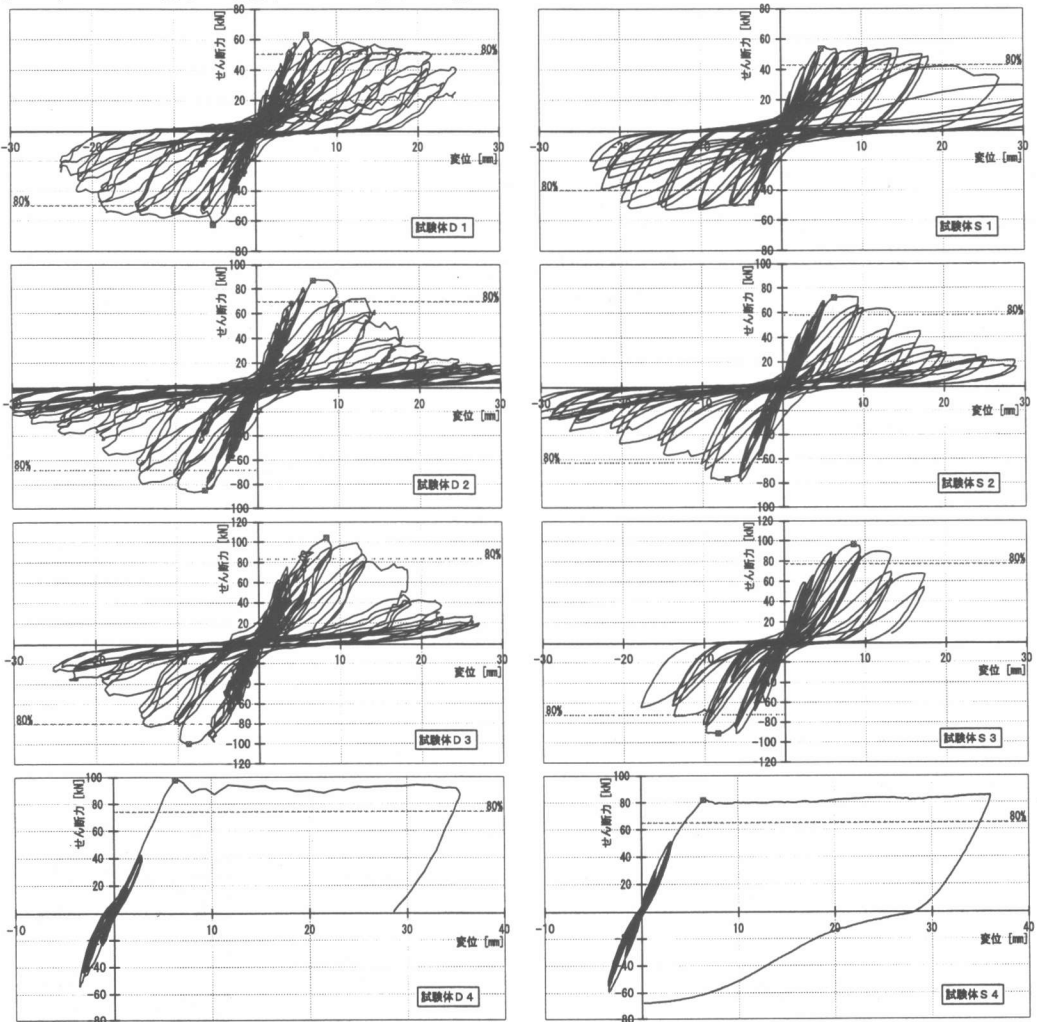


図-5 荷重-変形関係

#### 4. 実験結果の検討

##### 4.1 歪速度による降伏点強度の上昇

引張側隅筋の危険断面における主筋の歪速度を求める。主筋が降伏する最初の加力サイクル

において、歪ゼロから降伏するまでの平均歪速度を表-6に示す。動的載荷した試験体の歪速度は、 $2.36 \sim 7.96 \times 10^4 \mu/\text{sec}$ であり、実大実験の結果<sup>5)</sup>と対応している。

ここで、既往の定歪速度実験における歪速度と降伏点強度の関係式、式(1)<sup>4)</sup>を用いて、実験で得られた主筋の歪速度から、動的載荷における主筋の降伏強度を求めた。

$$\sigma_y' = \sigma_y(1.39 + 0.1577 \log \dot{\epsilon} + 0.01577(\log \dot{\epsilon})^2) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_y$ ：静的な降伏点応力度、 $\sigma_y'$ ：歪速度 $\dot{\epsilon}$   $\mu$ /secにおける降伏点応力度。

得られた歪速度における主筋の降伏点応力度の上昇は、試験体D1で17.2%、D2で18.3%、D4で23.9%である。得られた降伏点応力度を用いて、断面の曲げ精算により曲げ降伏時の強度を算定してみる。実験値と算定結果を表-7に示す。算定結果は、せん断破壊した試験体D3を除くと、実験値と良く対応しているのが分かる。従って、試験体の降伏強度の上昇は、引張鉄筋の降伏応力度上昇分で説明できる。

表-6 歪ゼロから降伏までの平均歪速度

試験体	D 1	D 2	D 3	D 4
歪速度	3.79 $\times 10^4$	2.97 $\times 10^4$	2.36 $\times 10^4$	7.96 $\times 10^4$
試験体	S 1	S 2	S 3	S 4
歪速度	55.3	34.0	26.7	19.9

単位： $\mu$ /sec

表-7 降伏点上昇を考慮した降伏強度計算値

試験体	D 1	D 2	D 3	D 4
降伏点上昇率 [%]	17.2	18.3	17.7	23.9
再計算値 [kN]	59.2	88.2	116.2	92.8
実験値/計算値	1.07	0.99	0.90	1.00

表-8 降伏後の耐力

試験体		D 1	D 2	S 1	S 2
降伏	せん断力 <sup>*1</sup>	63.1	87.0	53.4	72.4
	変位 [mm]	6.27	6.88	5.11	6.42
最大変位	せん断力 <sup>*1</sup>	53.9	74.8	50.9	72.7
	変位 [mm]	7.06	9.86	6.99	9.39
最終部材角 [rad]		0.033	0.024	0.033	0.024
ヒンジ回転角 [rad]		0.020	0.009	0.018	0.009

<sup>\*1</sup> 単位：kN

#### 4.2 降伏後の耐力の低下

梁主筋が初めて降伏した載荷で、降伏するまでは、歪速度は大きな値となっているが、降伏してからからその載荷の最大変位に至るまでは、

歪速度は急激に低下する。そのため、試験体D2を除いた動的載荷した試験体では、降伏時に比べて最大変位位置において急激に耐力が低下している。

降伏後の最大変形時の耐力及び、ヒンジ回転角を表-8に示す。すべての試験体において、靱性指針による保証回転角を下まわっている。また、動的載荷と静的載荷で明確な差は見られなかった。

#### 4.3 付着応力度

主筋の歪から求めた平均付着応力を図-6に示す。測定点の付着応力は隣り合う2つの測定点の平均付着応力の平均値とする。

部材角 1/1000 及び 1/800 の載荷では、平均付着応力度は動的載荷した試験体の方が、動的載荷による入力せん断力の上昇分を考慮しても、静的載荷した試験体よりも大きい。しかし、変形が大きくなると動的載荷と静的載荷で違いがなくなる。

載荷が進むにつれて、付着応力の最大値の位置が危険断面から載荷点方向に移動することは、動的載荷と静的載荷で共通している

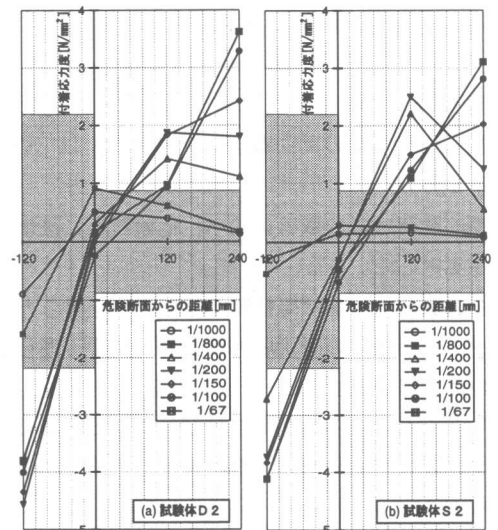


図-6 平均付着応力

#### 4.4 軸方向変形

梁危険断面から 210mm の区間の変形を測定

し、測定距離で除して軸歪を求めた。なお、試験体D4及びS4は、測定器が足りなかったため軸歪を測定できなかった。

各試験体のヒンジ領域における軸歪を図-7, 8, 9に示す。図中の印は部材が降伏した点を示す。試験体D1とS1では、各载荷の最大変形点での軸歪は、ほぼ一致しているが、その途中の経路は異なる。しかし、降伏後に、軸歪が急激に増加し、その後の繰返し载荷によっても軸歪が徐々に増加している事は共通している。

試験体D2とS2では、正方向载荷降伏時からその载荷の最大変形時まで軸歪が増加しない。その直後の除荷では、どちらの試験体とも軸歪が減少している。この後耐力低下が始まった。軸歪は、静的载荷の方が大きい。

試験体D3及びS3では、さらに軸歪が小さく軸歪は静的载荷の方が大きい。試験体D2及びS2と同様に、最大耐力時から最大変形時まで軸歪が一定値を示すか、または、軸歪の減少が見られた。また、除荷では、両試験体とも軸歪が減少し、耐力低下が始まった。

一般に、ヒンジ領域での軸歪の増加が無くなる、または、減少し始めた時、部材の耐力低下が始まるようである。

## 5. まとめ

RC片持ち梁の動的载荷実験により、以下の結果を得た。

- ・動的载荷は静的载荷に比べ、危険断面に破壊が集中した。
- ・動的载荷では曲げ降伏時せん断力が上昇したが、引張鉄筋の降伏応力度上昇に関する既往の研究で説明できる。
- ・ヒンジ領域での軸歪の増加が無くなる、または、減少し始めた時、部材の耐力低下が始まる。

## 参考文献

1) 岩井敏男ほか：鉄筋コンクリート橋脚の動的耐力に関する実験的研究，第6回地震工学シンポジウム梗概集，1982年12月，pp785-792

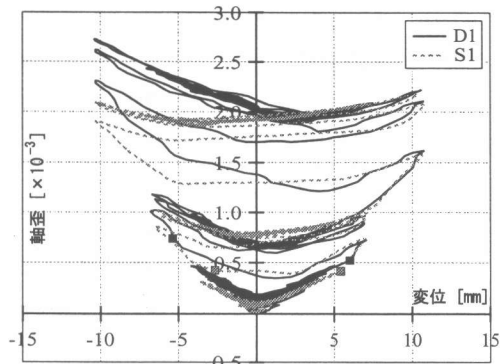


図-7 試験体D1, S1の軸歪

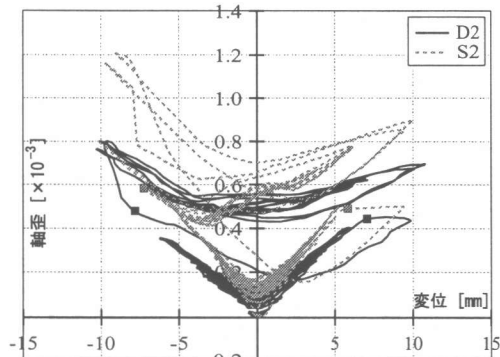


図-8 試験体D2, S2の軸歪

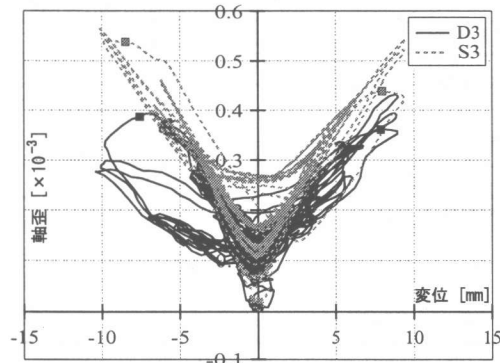


図-9 試験体D3, S3の軸歪

2) 細谷博ほか：地震時のひずみ速度の影響による鉄筋コンクリート部材の耐力の増大と破壊モードとの関係に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第492号，1997年2月，pp69-77

3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999年8月30日

4) 藤本盛久ほか：地震動を受ける単一山形鋼筋かいの高引張実験 地震時の衝撃的過荷重による鋼筋かいの破断に関する実験的研究その1，日本建築学会構造系論文報告集，第389号，1988年7月，pp.32-40

5) 細谷博ほか：実大3層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験(その7 地震時に部材に生じる歪速度の検討)，日本建築学会大会講演梗概集，1996年9月，構造IV，pp.815-816