

# 論文 動的繰返し荷を受ける鉄筋コンクリート片持ち梁の変形能に及ぼす荷速度とせん断力の影響

金子 洋<sup>\*1</sup>・楠原 文雄<sup>\*2</sup>・塩原 等<sup>\*3</sup>

要旨：せん断余裕度が同一でも，曲げ降伏時にコンクリートが受ける圧縮応力，横補強筋が降伏した後の変形能は，異なる場合がある。そこで，1/2.5 スケールの片持ち梁 4 対の動的および静的荷を行い，荷速度の影響を検討した。動的荷により曲げ降伏時入力せん断力が 10.6% ~ 14.1% 上昇した。耐力低下の開始時の部材角の大きさは，横補強筋の歪度の影響はほとんどみられなく，曲げ降伏時のコンクリート応力が大きくなるほど部材角も大きくなった。圧縮鉄筋は残留歪の影響を受けて，曲げ降伏後も応力が上昇し，耐力低下前の荷では，梁危険断面の引張り鉄筋において，歪硬化が生じたことが視察された。

キーワード：鉄筋コンクリート，片持ち梁，荷速度，繰返し荷

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は，荷速度によって，復元力特性が異なることが知られている。現在までに荷速度を変えた実験が行なわれ，鉄筋コンクリート部材の耐力，変形能に及ぼす荷速度の影響が検討されてきた(例えば<sup>1), 2), 3)</sup>。しかし，荷速度が曲げ降伏後の変形性能に及ぼす影響とその機構について，十分に解明されているとはいえない。そこで，鉄筋コンクリート部材の曲げ降伏強度時のせん断力とせん断終局強度の比率をほぼ同じにして，引張鉄筋比，横補強筋比を変数とした曲げ降伏先行型鉄筋コンクリート片持ち梁試験体を作成し，それらの耐力，曲げ降伏後の変形能，破壊性状に及ぼす荷速度の影響を検討する。

表 - 1 試験体諸元

試験体	D9 S9	D10 S10	D11 S11	D12 S12
断面	200 × 300			
主筋	3-D16		4-D16	2-D16
引張鉄筋比	1.10%		1.48%	0.74%
横補強筋	2-φ <sup>*1</sup>	φ <sup>*2</sup>	2-D6	φ <sup>*1</sup>
横補強筋比	0.32	0.19	0.98	0.19
横補強筋間隔	65mm			
せん断余裕度	2.42	2.05	2.20	2.40

表 - 2 鋼材の材料特性

鉄筋種類	降伏点 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	弾性係数 [N/mm <sup>2</sup> ]
D16	420.5	619.6	177 × 10 <sup>3</sup>
φ <sup>*1</sup>	472.9	497.2	189 × 10 <sup>3</sup>
φ <sup>*2</sup>	734.5	999.5	200 × 10 <sup>3</sup>
D6	421.0	544.3	180 × 10 <sup>3</sup>

\*1, \*2 は 0.2% オフセット強度

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体 4 対(計 8 体)の諸元を表 - 1 に，断面配筋リスト及び形状を図 - 1 に示す。試験体名の D は動的荷試験体，S は静的荷試験体を示す。試験体の設計には，鉄筋コンクリート造建物の

靱性保障型耐震設計指針・同解説<sup>4)</sup>を用いて，曲げ降伏型として設計した。試験体は片持ち梁であり，曲げ強度とせん断強度の比は，すべて 2.0 ~ 2.5 の間をなすようとした。試験体の縮尺は，実大の約 1/2.5 とした。全試験体は共通に，反力

\*1 清水建設 工修 (正会員)

\*2 東京大学 工学部建築学科助手 工修 (正会員)

\*3 東京大学 工学部建築学科助教授 工博士 (正会員)

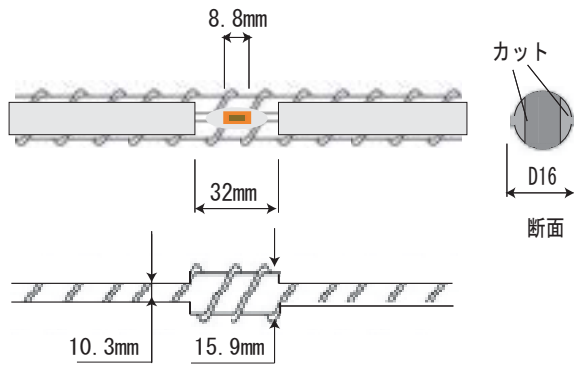


図 - 2 梁主筋 D16 加工図

床に固定するスタブを持ち、梁断面は 200mm × 300 mm (幅 × せい) の長方形、横補強筋間隔は 65mm、せん断スパンは 750 mm である。

梁主筋は、上端筋、下端筋 2 本の主筋の降伏後における応力を計測するため、歪計測位置 3 箇所から両端 16mm を残し、断面積を 20% カットした。また、残った主筋の降伏後の歪度を計測するため、すべての断面で断面積を 20% カットした。降伏後の応力を計測するために加工した鉄筋の形状を図 - 2 に示す。

鉄筋の材料特性を表 - 2 に、コンクリートの材料特性を表 - 3 に示す。横補強筋に使用した  $\phi 4$  は明確な降伏点を示さなかったため、降伏強度を 0.2% オフセットにより求めた。

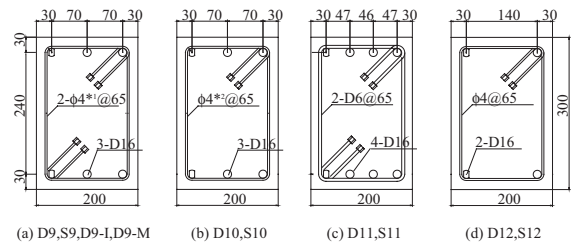
D9, S9 試験体は、基準となる試験体で、引張り鉄筋を 3-D16、横補強筋を 2- $\phi 4^{*1}$  とした。D10, S10 は、横補強筋の降伏歪度が曲げ降伏後の変形性能に及ぼす影響を検討するため、横補強筋を降伏歪の大きな高強度補強筋  $4\phi^{*2}$  とした。さらに、曲げ降伏時のコンクリートの応力の大きさが、曲げ降伏後の変形性能に及ぼす性能を検討するため、D11, S11 では引張り鉄筋を 4-D16、横補強筋を 2-6D とし曲げ降伏時の応力を大きくし、D12, S12 では引張り鉄筋を 2-D16、横補強筋を  $4\phi^{*1}$  とし曲げ降伏時の応力を小さくした。

## 2.2 荷重方法

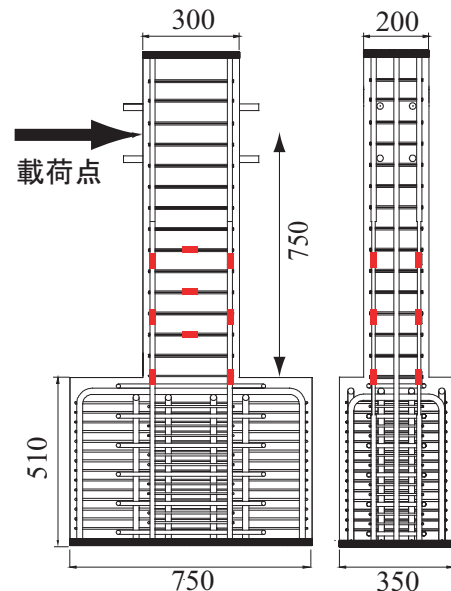
加力装置を、図 - 3 に示す。高強度鋼を用いて、反力床に梁を鉛直に圧着し、アクチュエーターにより水平方向の繰返し荷重を行った。加力は、配筋が同一な一対の試験体に対して、試験体 D9、

表 - 3 コンクリートの材料特性

材齢	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	弾性係数 [N/mm <sup>2</sup> ]
28 日	25.0		
74 日	25.3	2.47	$26.7 \times 10^3$
81 日	28.1	2.51	$29.6 \times 10^3$
97 日	27.5	2.48	$29.2 \times 10^3$



(a) 試験体断面図



(b) 試験体配筋図

図 - 1 試験体

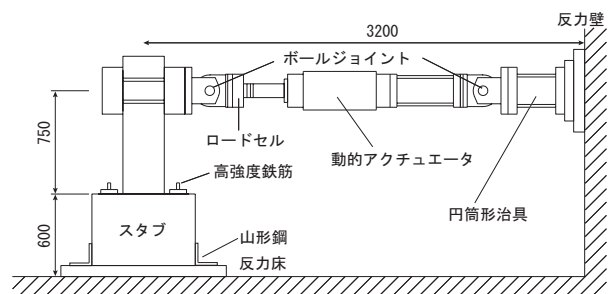


図 - 3 試験体

D10, D11, D12 では荷重速度を 100mm/sec (動的荷重) とし、S9, S10, S11, S12 では荷重速

度を 0.1mm/sec (静的載荷) とした。

載荷履歴を図 - 4 に示す。載荷は同一振幅で、変位制御の正負交番漸増振幅繰返し載荷とした。載荷は 6 回に分けて行い、各載荷の後にひび割れ観察および写真撮影を行った。

## 2.2 計測方法

加力点に加わるせん断力をロードセルにより、梁の加力点での変形及び回転角を可視光線レーザー変位計により、主筋及び横補強筋の歪を歪ゲージによりそれぞれ測定した。

データの取得には、動歪測定器を用いた。サンプリング周期は、動的載荷で 1/1000 秒、静的載荷で 1 秒とした。尚、動的載荷ではデータを 5 つずつ平均して、実験データとした。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状

すべての試験体で、初めに梁危険断面に曲げひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れが発生し、曲げ降伏に至った。その後の載荷で、せん断ひび割れの拡大、進展が繰り返され、部材角 4% または 4% の繰返し載荷により耐力が低下した。最終載荷では、被りコンクリートが剥落し、梁ヒンジ領域で主筋がはらみ出し破壊に至った。動的載荷の試験体と静的載荷の試験体では特徴的な違いは見られなかった。

試験体 D9, S9 と試験体 D10, S10 では、ひび割れ性状に違いは見られなかった。試験体 D9, S9 と試験体 D11, S11 を比較すると、試験体 D11, S11 は試験体 D9, S9 より、全体にせん断ひび割れが発生した。試験体 D9, S9 と D12, S12 を比較すると、試験体 D12, S12 は大きなせん断ひび割れが 2 つだけ入り、試験体 D9, S9 より梁危険断面に近い箇所、破壊が集中した。試験体 D10, S10 の部材角 1.5% 後のひび割れ状況を写真 - 1 に示す。

### 3.2 入力せん断力 - 全体変形関係

動的載荷の試験体と対になる静的載荷の試験体のせん断力 - 部材角関係を図 - 5 に示す。動的載荷と対になる静的載荷の試験体について、

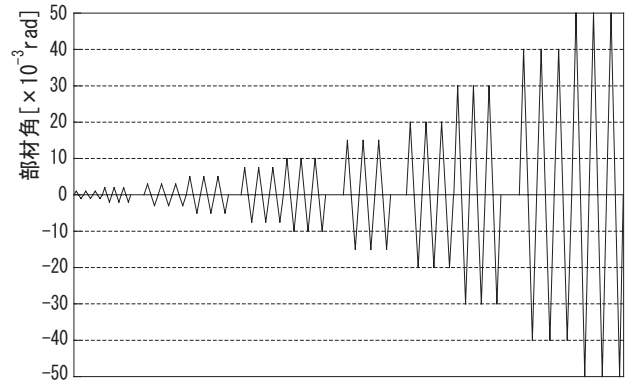


図 - 4 載荷履歴



(a) D10

(b) S10

写真 - 1 部材角 15/1000 における破壊状況

表 - 4 曲げ降伏強度 (正負の平均)

試験体	D9	D10	D11	D12
曲げ降伏強度[kN]	83.2	82.2	108.1	53.3
試験体	S9	S10	S11	S12
曲げ降伏強度[kN]	74.9	74.2	101.4	46.7
動的/静的	111.1	110.8	106.6	114.1

正負の曲げ降伏強度の比較を表 - 4 に示す。部材の曲げ降伏強度は、危険断面の引張り鉄筋が、主筋の材料試験の降伏歪に到達したサイクルの最大荷重とした。

動的載荷の試験体では、各載荷の最大振幅点での耐力が低下しているが、これは最大振幅点で載荷速度が低下し、それに伴って歪速度が低下しており、対応する静的載荷の同じ変位での

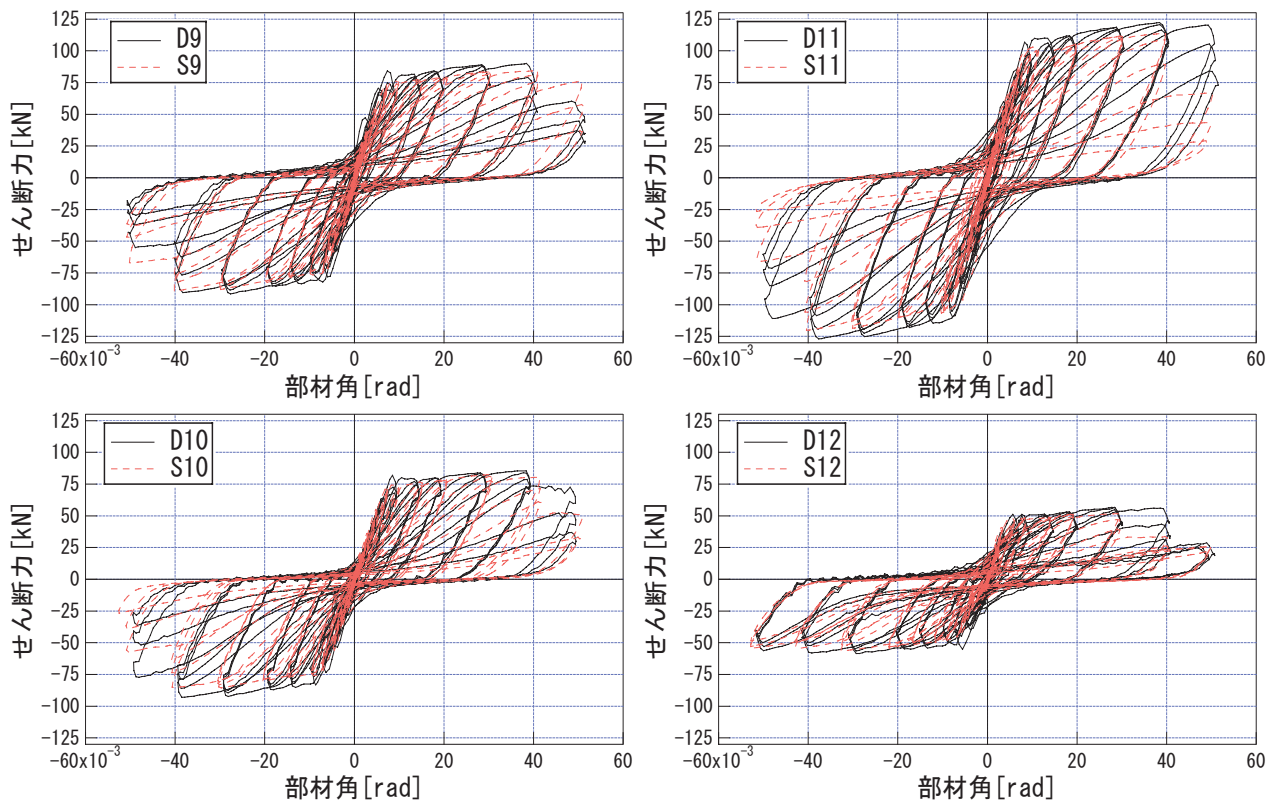


図 - 5 荷重 - 変形関係

耐力まで低下しているの、歪速度の影響と考えられる。

試験体 D9 及び S9 では、部材角 4% の 1 サイクル目の載荷まで、試験体 D9 が試験体 S9 より最大入力せん断力が上昇した。その他の試験体では、すべての載荷振幅で、動的載荷の試験体が対となる静的載荷の試験体より最大入力せん断力が上昇した。試験体 D11 及び S11 の試験体では、試験体 D11 は部材角 5% の載荷まで耐力を保持したが、試験体 S11 は部材角 4% の繰返し載荷により耐力が低下した。また、試験体 D12 及び S12 の試験体では、試験体の正方向載荷で耐力が低下したが、負方向載荷では耐力が低下しなかった。

試験体 D9, S9 と試験体 D10, S10 は、ほぼ同じ部材角まで耐力を保持し続けた。試験体 D10, S10 は試験体 D9, S9 より、せん断余裕度が低くかつ耐力低下時の横補強筋の歪度が大きい試験体である。ひび割れ状況が同じでせん断横補強筋の歪度が大きいとせん断ひび割れ幅は大きくなる。耐力低下の始まる時の変形能は、せん断

ひび割れ幅に影響を受ける<sup>4)</sup>とされているが、今回の実験では、せん断ひび割れ幅は、耐力低下の始まる時の部材角にあまり影響を与えていない。また、試験体 D9, S9 と試験体 D11, S11 と試験体 D12, S12 では、曲げ降伏時のコンクリート応力が大きくなるにつれて、耐力が低下するまでの変形能が増加した。

#### 4. 実験結果の検討

まず、加工を施していない断面が、常に弾性であり、20%カットした断面で塑性変形が起きると仮定した。加工を施していない断面の応力度の 1.25 倍が、断面を 20% カットした主筋の応力度となる。加工を施さない断面の歪から求めた、20% カットした断面の応力度を用いて以下の検討を行う。

##### 4.1 歪速度による降伏点強度の影響

梁危険断面での引張鉄筋の曲げ降伏強度を表 - 5 に示す。動的載荷をした試験体では、対になる試験体に対して、降伏強度が上昇した。梁危険断面の引張り鉄筋の降伏強度の上昇を考慮す

ることで、部材の降伏強度の上昇を推定できる。

すべての断面で断面積を 20%カットした鉄筋に添付した歪ゲージを用いて、梁危険断面における引張鉄筋の降伏後の歪速度を求める。ここで、時間あたりの歪度の変化量を歪速度と定義する。動的載荷をした試験体において、降伏棚の平均歪速度を表 - 6 に示す。この時の歪速度、 $1.89\sim 31.2 \times 10^{-2} \text{ mm/mm/sec}$  であった。この値は、鉄筋コンクリート造骨組みの実大実験の結果と対応している。

既往の研究<sup>5)</sup>における、歪速度を考慮した鋼材の降伏点上昇の推定を式(1)に示す。

$${}_d f_y = (0.90 + 0.05 \log(\dot{\epsilon})) \cdot f_y \quad (1)$$

ここに、 ${}_d f_y$ :動的載荷の降伏点強度、 $f_y$ :静的載荷の降伏点強度

この式を用いて、静的試験体から得られた主筋の降伏点強度から動的試験体の降伏点強度を計算すると試験体 D9 は 13.5%、D10 は 12.8%、D11 は 13.2%、D12 は 14.2% 上昇する。得られた鋼材の降伏点強度と、動的実験から得られた降伏強度を比較すると、最大誤差は 15% となる。

#### 4.2 主筋応力度

20%カットした断面の応力度分布の一例を図 - 5 に示す。歪ゲージは梁危険断面、梁危険断面から 180mm、36mm の 3 箇所を計測した。

部材角 0.1% から 0.5% の載荷において、一般に引張り鉄筋の応力は、モーメント分布に沿うように分布していた。梁危険断面から 180mm (梁せいの 0.6) の引張り鉄筋は、梁危険断面とほぼ同じサイクルで降伏し、2 点間の応力の差が小さくなった。耐力低下の始まる前のサイクルで危険断面の応力が、歪硬化により大きくなった。圧縮鉄筋では、曲げ降伏後も圧縮力が増加した。これは、鉄筋の引張り降伏により、鉄筋に残留変形が発生し、鉄筋が圧縮力を受ける際、残留変形だけ余計に圧縮力を受けると考えられる。動的載荷の試験体では、静的載荷の試験体に比べて、梁危険断面から 0.6D の位置での応力が大きくなった。

表 - 5 降伏時の降伏点強度 (正負平均)

試験体	D9	D10	D11	D12
降伏点強度[N/mm <sup>2</sup> ]	402	410	436	455
試験体	S9	S10	S11	S12
降伏点強度[N/mm <sup>2</sup> ]	397	408	408	411
動的/静的	1.01	1.01	1.07	1.11

表 - 6 降伏棚の平均歪速度と降伏点強度上昇

試験体	D9	D10	D11	D12
平均歪速度[ $\times 10^{-2}$ ]	18.3	31.2	20.1	1.89
降伏点強度上昇率[%]	16.3	17.4	16.4	10.3

\*部材角 1.5% の降伏棚

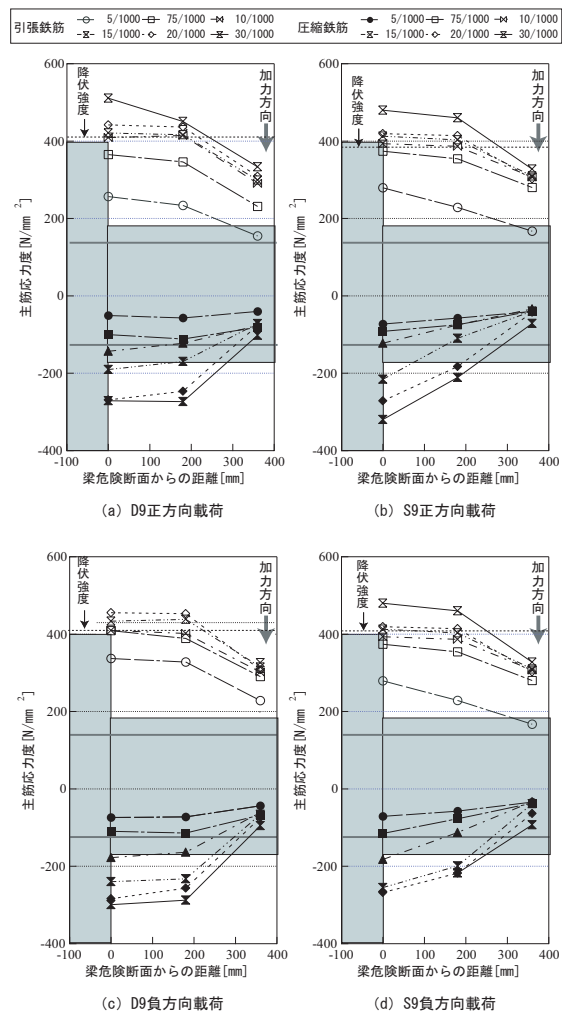


図 5 - 鉄筋の応力分布

#### 4.3 横補強筋の歪分布

試験体 D9, S9 および試験体 D10, S10 の横補

強筋の歪分布を図 - 6 に示す。横補強筋の歪ゲージは、梁危険断面から 130mm, 260mm, 390mm の補強筋に添付した。一般に、部材角 2%まで、梁危険断面から離れるにつれて、歪度が大きくなった。また、耐力低下が起こる前の 3%のサイクルで梁危険断面近傍での歪の上昇率が大きくなる。

試験体 D9 は、梁危険断面から 130mm の横補強筋が一番早く降伏し、試験体 S10 は梁危険断面から 390mm の横補強筋が一番早く降伏した。動的載荷をした試験体と静的載荷をした試験体では違いは見られなかった。

## 5. まとめ

RC 片持ち梁の動的並びに静的載荷実験により以下の結果を得た。

- (1) 曲げ降伏強度時のコンクリート強度が大きいほど、耐力低下時の変形能は増加した。
- (2) せん断ひび割れ幅は、耐力低下時の変形能に大きな影響を与えない。
- (3) 動的載荷をした試験体は、載荷速度の影響を受けて、静的載荷をした試験体より、梁の曲げ降伏強度が 7% から 14% 上昇した。
- (4) 動的載荷では、静的載荷に比べて梁危険断面から 0.6D (D: 梁せい) 離れた位置の引張り鉄筋で応力が大きくなる傾向がみられた。
- (5) 耐力低下の始まる前のサイクルで、危険断面の引張り鉄筋の応力が、歪硬化により急に上昇した。
- (6) 圧縮鉄筋は、曲げ降伏後も残留歪の影響を受けて圧縮力が増加していく傾向が見られた。
- (7) 横補強筋は、耐力低下が始まる前で、危険断面近傍の歪が大きくなる様子が見られた。

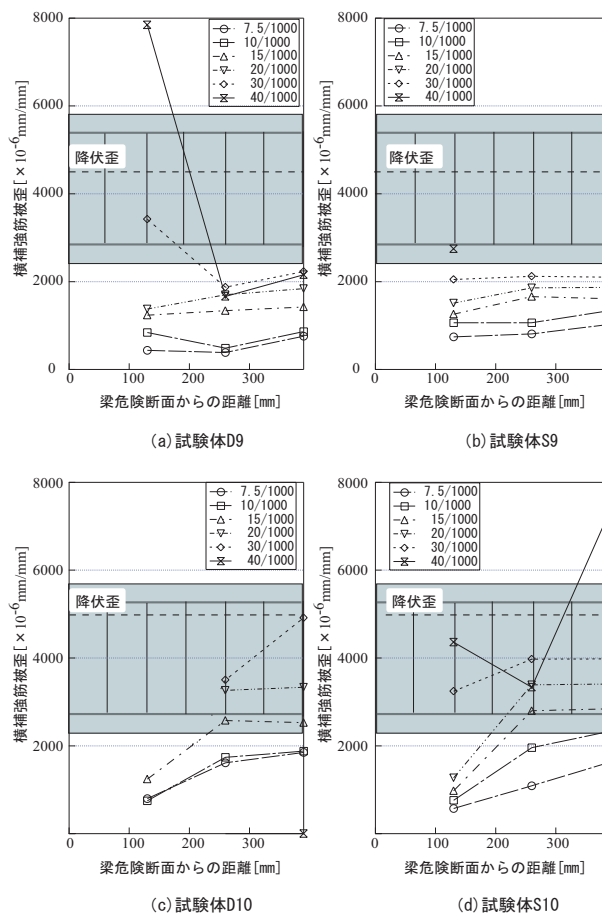


図 - 6 横補強筋の歪分布

## 参考文献

- 1) 金子貴司ほか: せん断余裕度確保の方法が異なる鉄筋コンクリート梁部材の動的載荷実験, コンクリート工学年次報告集, Vol.24, No.2, pp.337-342, 2002
- 2) 細谷博ほか: 地震時の歪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, pp.69-77
- 3) 小谷俊介: 鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響, コンクリート工学, Vol.21, No.11, pp.23-34, 1983.11
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保障型耐震設計指針・同解説, 1999 年 8 月 30 日
- 5) 細谷博ほか, 実大 3 層鉄筋コンクリート造骨組みの振動台実験 (その 7 地震時に部材に生じる歪速度の検討), 日本建築学会大会後援梗概集, 1996 年 9 月, 構造, pp.815-816