

論文 交番繰返し荷重下における降伏後の鉄筋の構成則に及ぼすひずみ速度の影響

永峰 雅史^{*1}・島 弘^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート部材の地震に対する非線形応答は、荷重速度によって異なることが知られている。したがって、鉄筋コンクリートの構成材料の1つである鉄筋の構成側に対するひずみ速度の影響は、構造物の地震応答を明らかにするためにも重要である。しかし、鉄筋単体の降伏後の交番荷重下における構成側に対するひずみ速度の影響は明らかにされていない。本研究では、鉄筋の非線形構成側に対するひずみ速度の影響を調査検討した。

キーワード：鉄筋、ひずみ速度、交番繰返し載荷、履歴曲線

1. はじめに

構造物は地震に対して、その構成要素の塑性変形によって振動エネルギーを吸収し、最終的な崩壊を免れることが可能である。地震による被害を抑えるためには、粘り強い変形性能を与えて地震力を吸収させることが重要であり、鉄筋コンクリートの場合は鉄筋によってその効果を生んでいる。地震力は動的で繰返し作用する外力であり、構造部材にはある大きさのひずみ速度が生じている。静的実験と実地震時挙動との差異や動的非線形応答時の粘性減衰を知るなどのためには、構造部材の非線形応答に対するひずみ速度の影響を検討する必要がある。鉄筋コンクリート部材の応答の要因は、コンクリート、鉄筋、付着の3つによる。構成材料の1つである鉄筋単体の構成則に対するひずみ速度の影響は、構造物の地震応答を明らかにするために重要である。そこで鉄筋の降伏限界を超えた引張・圧縮繰返し実験においてひずみ速度の影響を調査検討することにした。

2. 過去の研究と問題点

過去の引張・圧縮繰返しを受ける鋼材の挙動に関する研究は多くあり^{1)~7)}、これらの実験は、鋼材の引張・圧縮繰返しの実験ではあるが、ひずみ速度の影響を取り入れたものではない。逆に、ひずみ速度の影響に関する実験は、ほとんどが単純引張試験によるものである。岩井ら³⁾の実験によれば、鉄筋が動的な外力の作用を受けた場合、上部及び下部降伏応力度はひずみ速度の対数値に比例して上昇し、応力の上昇率は7~18%であることや弾性係数・引張強度や破壊時のひずみはひずみ速度の影響はほとんどないことなどが明らかにされている。また別の文献⁴⁾では、速度が大きい場合、上降伏点が明瞭に現われることを指摘している。これらの問題点として、ひずみ速度の影響を調査する引張・圧縮繰返し実験はほとんど見当たらない。したがって、地震力を想定した動的なものから、きわめてゆっくりとした載荷速度の範囲での、交番繰返し実験を行い、交番繰返し荷重下におけるひずみ速度の影響を調べる必要がある。

*1 高知工科大学 社会システム工学科 (正会員)

*2 高知工科大学教授 社会システム工学科 工博 (正会員)

3. 実験計画

3.1 試験体

試験体は、異形鉄筋 SD295、鉄筋径 D32 から試験部の断面の直径がφ14mm である試験体に切削加工することにより作製した。圧縮時の曲げ座屈の影響を受けさせないようにするために、試験部の長さを短くしている。また、両端はネジ加工してあり、試験機にネジにより固定できるようにしている。加工した鉄筋と元々の鉄筋との違いは、静的な単調引張試験の結果から、鉄筋の性質に大きな変化は見られないと判断した。

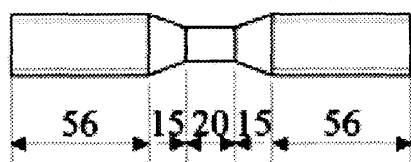


図-1 試験体

3.2 载荷計画

载荷速度は、小谷⁸⁾の報告によると、衝撃荷重のひずみ速度は 0.01~1000/s 程度で地震荷重のひずみ速度は 0.001~0.1/s 程度になるとあり、これを参考に表-1 のようにひずみ速度を設定した。試験体 I が衝撃荷重、試験体 II が地震荷重、試験体 III が静的荷重、試験体 IV が静的载荷よりも遅いものとした。

3.3 計測方法

荷重と変位は、動的油圧試験機に内蔵されているロードセルと変位計により試験機から出力されるデータを用いた。また、ひずみは曲げによる影響を確認するために、試験体中

央の周囲に 4 枚の塑性領域まで測定できるひずみゲージを貼り付けた。载荷パターンは、図-2 のように 1 周期ごとに変位を増加させて行き、変位速度を一定にするために 1 周期の時間も増加させている。表-2 が 1 周期ごとの変位と時間である。ひずみ速度は、微小区間の傾きの平均として求めた。試験は動的油圧試験機 (最大容量 250kN) を用いて行い、マイクロプロファイラのプログラムにより変位制御で载荷した。

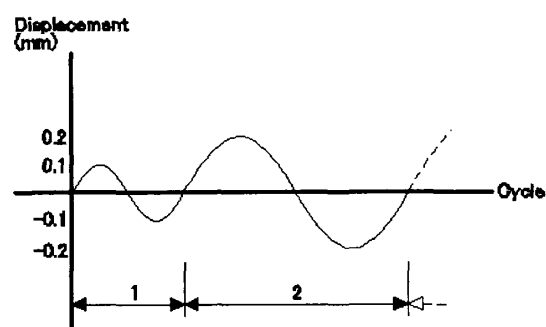


図-2 载荷パターン

表-1 ひずみ速度

試験体番号	ひずみ速度 (/s)
I	2.5×10^{-1}
II	2.5×10^{-2}
III	2.5×10^{-4}
IV	2.5×10^{-6}

図-3 のようにそれぞれのアナログの値をデジタル型動ひずみ測定器によりデジタル化して記録した。データのサンプリングは最初の周期で 100 個のデータが取れるように記録するデータの間隔を設定した。

表-2 1 周期毎の時間

周期		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
変位(mm)		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	合計
1周期の時間(秒)	I	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	5.5
	II	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	55
	III	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	5500
	IV	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	90000	100000	550000

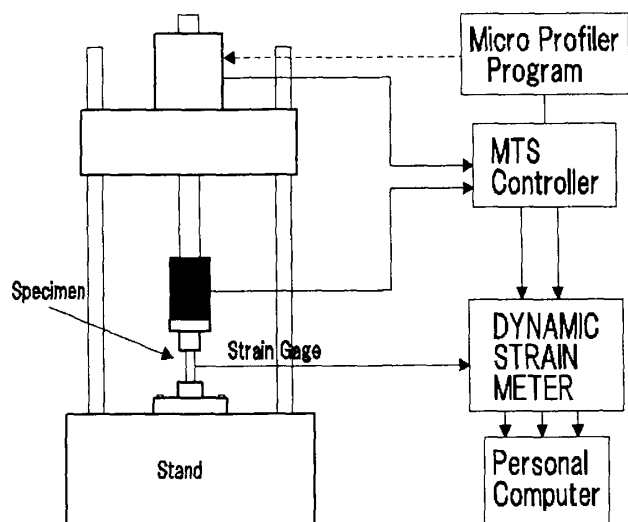


図-3 計測システム

4. 実験結果

実際に作用しているひずみ速度は設定したものと異なり、実験結果から得られたひずみゲージのデータから、実際のひずみ速度は表-3のような結果となった。ひずみ速度の値は、微小区間の傾きの平均として求めた。実験はひずみ制御ではなく、変位制御で载荷しているため治具や試験体の試験部以外の伸びだしにより設定した変位が試験部に十分に作用しなかったために、ひずみ速度が減少したものであると思われる。しかし、この結果は試験前に設定した载荷計画に示した载荷速度の分類と

同じ範囲内であると考えて、支障はないと判断した。

試験体 I～IVから得られた応力-ひずみ関係の結果を図-4に示す。この履歴曲線は、Y軸のプラス側が引張応力でマイナス側が圧縮応力を示す。応力は、ロードセルの荷重の値と、試験体断面寸法からの断面積で計算した。また、ひずみの値はひずみゲージの4枚うちで明らかに値がずれているものを省いた中から値が似ているものを選びだし、それらを平均して求めた。図-4の実験結果からは、ひずみ速度が速くなるほど上降伏点が明確に現われている事など、単純引張試験と同じ結果となった。

表-3 平均ひずみ速度

試験体番号	平均ひずみ速度 (/s)
I	1.0×10^{-1}
II	1.0×10^{-2}
III	1.0×10^{-4}
IV	1.0×10^{-6}

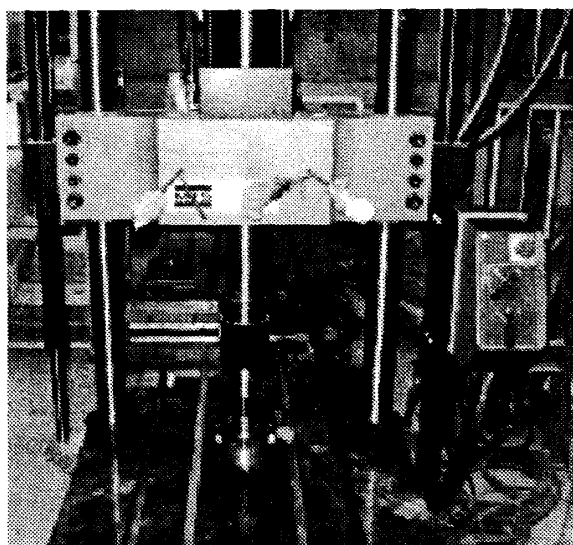


写真-1 実験風景

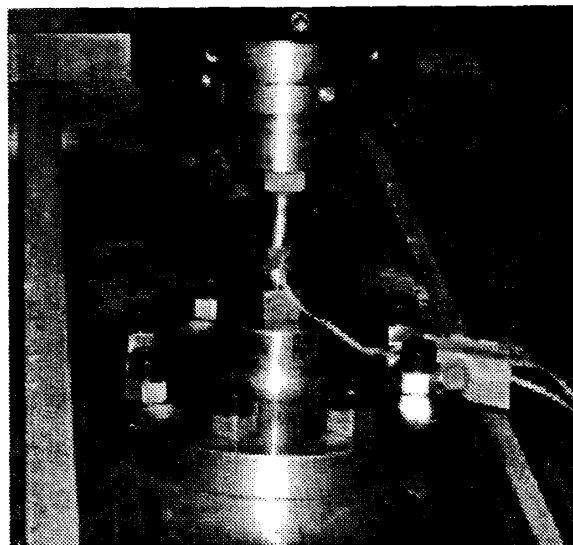


写真-2 実験風景

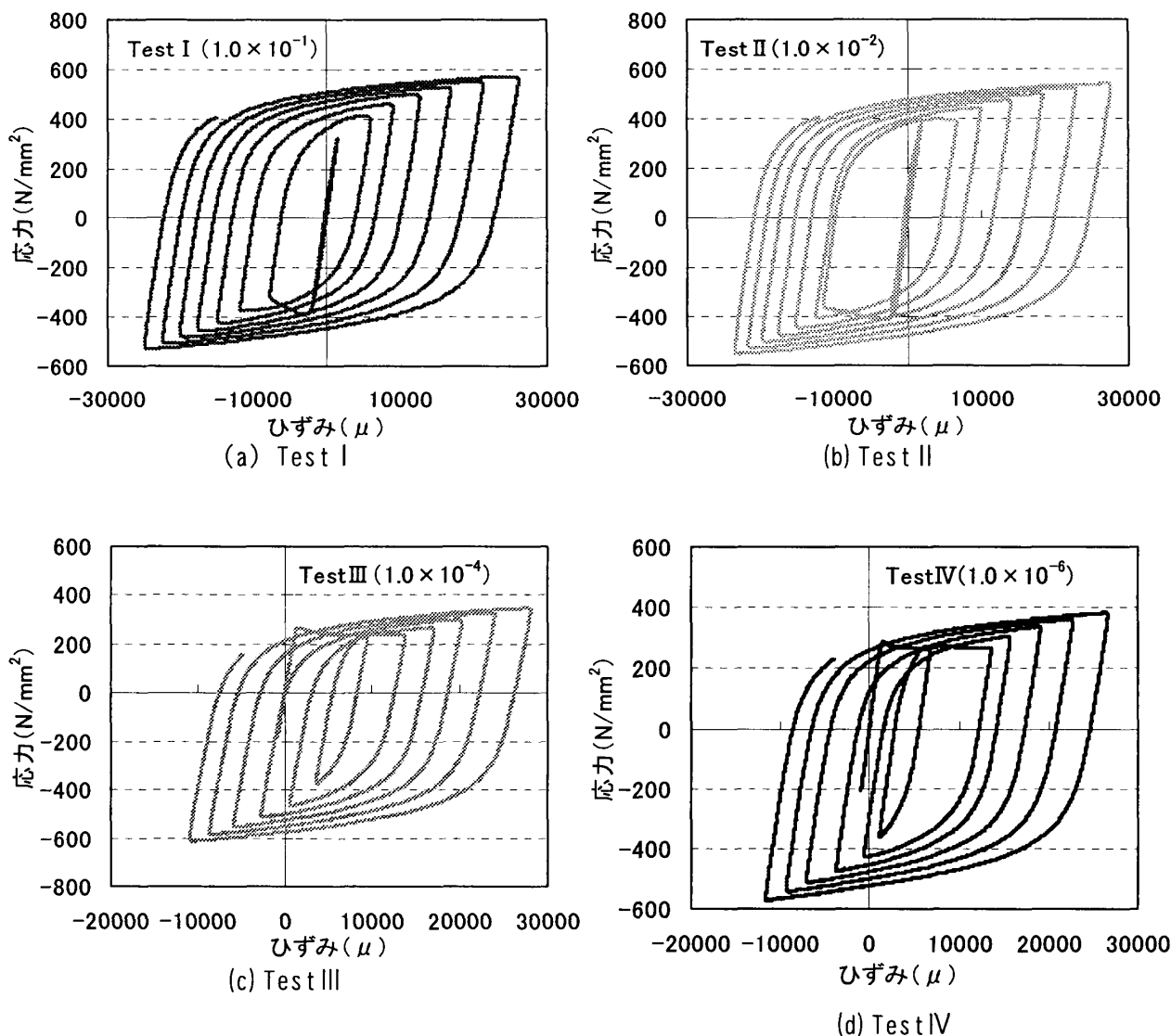


図-4 履歴応力-ひずみ関係

5. 考察

図-5 は、1 サイクルにおいて引張と圧縮側での歪と応力が最大となる応力反転位置の点を全サイクルについて取り出したものである。これをみると、引張側（プラス側）と圧縮側（マイナス側）で応力やひずみにずれが生じている。図-4 から判るように、ひずみ履歴がそれぞれ異なるため、ひずみ方向にずれが生じた結果となった。この異なる履歴曲線の結果からひずみ速度の影響を比較するために、引張・圧縮の平均をとる必要がある。

図-6 は、 n サイクルでの引張時 (ε_1, σ_1), 圧縮時 (ε_2, σ_2) での応力の反転位置に当たる応力とひずみの値を平均化し、(σ_n, ε_n)

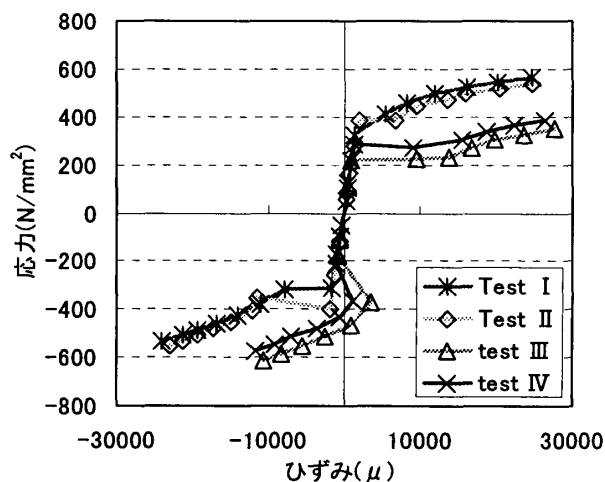


図-5 極値の応力-ひずみ関係

のそれぞれのサイクルでの求め方を示したも

のである。これを元にプロットしたものを図-7に示す。また、同じ鉄筋の試験体で行った静的載荷での単純引張試験も合わせて載せている。

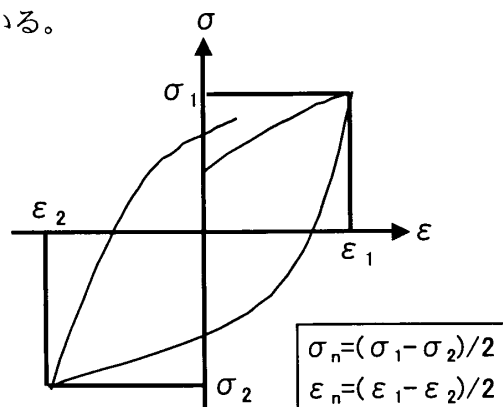


図-6 反転位置の平均化

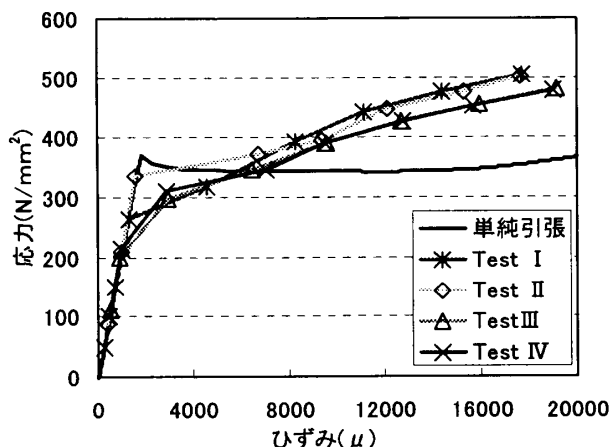


図-7 平均応力-ひずみ関係

図-7よりTest Iの最後の点である17000 μ を基準として、その時の応力を σ_{smax} としてそれぞれのひずみ速度について取り出したものを図-8に示す。図-8から、ひずみ速度が速くなると、降伏後の繰返し荷重下における応力ひずみ履歴の最大応力が大きくなるといえる。

しかし、はじめに述べたように、ひずみ速度による鉄筋コンクリート部材の応答変化の要因は、コンクリート、鉄筋、付着の3つによる。そこで、降伏後の鉄筋の応力ひずみ履歴に対するひずみ速度の影響の度合いとコンクリート強度および付着応力に対するひずみ速度の影響の度合いとの比較を行った。コン

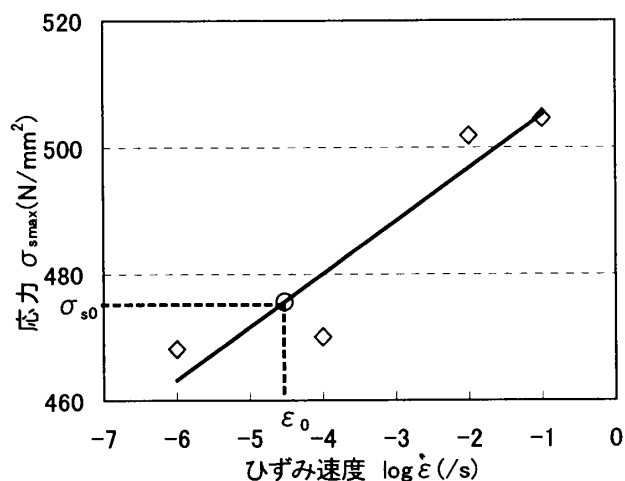


図-8 最大応力とひずみ速度の関係

クリート強度については、Reinhardt ら¹⁰⁾の式を、付着応力については、石本・島ら¹¹⁾の式を用いた。

Reinhardt ら¹⁰⁾によるコンクリートの圧縮強度に対するひずみ速度の影響は、式(1)で表される。

$$\begin{aligned} f_c / f_{c0} &= (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^a \\ a &= (5 + 3 \cdot f_{cm} / 4)^{-1} \\ \dot{\epsilon}_0 &= 30 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 f_{c0} は立方体供試体の静的圧縮強度であり、本検討では f_{c0} を20 N/mm²とした。

付着については石本・島ら¹¹⁾の付着応力-すべり関係に及ぼす載荷速度の影響の実験結果と比較した。実験式は次の通りである。

$$\tau_{max}(\dot{\epsilon}) / f'_c{}^{2/3} = 1.94 + 0.153 \times \log(\dot{\epsilon}) \quad (2)$$

ここに、 τ_{max} は最大付着応力(N/mm²)、 f'_c はコンクリート圧縮強度(N/mm²)である。しかし、比較を行う実験式は横軸にはひずみ速度で統一されているが、縦軸に関してはそれぞれ違った式のつくりをしている。これらを統一して比較するために、Reinhardt ら¹⁰⁾のコンクリートの圧縮強度と静的圧縮強度との比に対するひずみ速度の関係式を基準として、付着の式を以下のように変形した。すなわち、実験式(2)を静的最大付着応力 τ_{max0} で除して、

$$\frac{\tau_{\max}}{\tau_{\max 0}} = \frac{1.94 + 0.153 \log \dot{\epsilon}}{1.94 + 0.153 \log \dot{\epsilon}_0} \quad (3)$$

とした。

鉄筋も同様に、各ひずみ速度における応力を $\dot{\epsilon}_0=30 \times 10^{-6}$ に対応する応力 σ_{s0} で除したもので比較を行う。 $\dot{\epsilon}_0$ に対応する応力 σ_{s0} は、図-8 から $\sigma_{s0}=476 \text{ N/mm}^2$ となる。以上の式 (1)、式 (3) と各ひずみ速度における鉄筋の応力を比較したものを図-9 に示す。

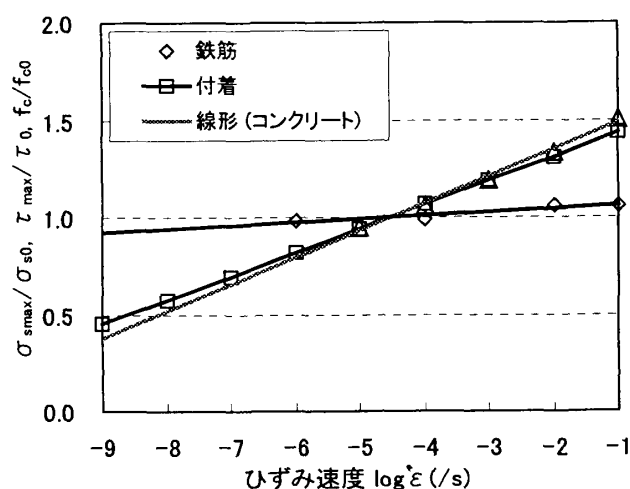


図-9 コンクリート，付着との比較

図-9 より、鉄筋の交番繰返し载荷をした場合のひずみ速度の影響は、コンクリートや付着に対する影響に比べて小さいと言える。

6. まとめ

本研究における実験から以下のことが得られた。

鉄筋単体の降伏以降におけるひずみ速度が異なる交番繰返し荷重下の応力-ひずみ履歴曲線においては、ひずみ速度が高いほど同じひずみに対する応力は大きくなった。

今回実験した範囲では、鉄筋単体の降伏以降における交番繰返し荷重下の応力-ひずみ履歴曲線に対するひずみ速度の影響は、コンクリートの圧縮強度や付着応力に対する影響に比べて小さい結果となった。

参考文献

- 1) 加藤・秋山・山内：鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験測，日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.48，pp937-938，昭和48年10月
- 2) 福知・土井・井崎：鋼材の繰返し履歴挙動に関する研究，日本建築学会論文報告集，第294号，昭和55年8月，pp.53-59
- 3) 岩井・吉田・中村・若林：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第314号，pp.102-111，昭和57年4月
- 4) 陸好：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，東京大学学位論文，1985年
- 5) 松本・出口・白石・前村：交番載荷時の鉄筋の応力-歪関係について，土木学会第42回年次学術講演会，昭和62年9月，pp.234-235
- 6) 葛野・藤井・山口・池田：構造用鋼材の応力-歪み特性に関する研究，土木学会第53回年次学術講演会，平成10年10月，pp.188-189
- 7) 小野・佐藤：金属系素材の応力-歪度関係の定式化，日本建築学会構造系論文集 第532号，2000年6月，pp.177-184
- 8) 小谷：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.11，1983年11月，pp.23-34
- 9) 小阪義夫・森田司郎：鉄筋コンクリート構造，丸善株式会社，pp50-51，1980
- 10) コンクリートの力学特性に関する調査研究報告，コンクリート・ライブラリー第69号，平成3年7月，pp.68-73
- 11) 石本・島：定着鉄筋の伸び出し量に対する荷重速度の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16 No.2，1994年，pp.235-240