

# 歪速度が拘束コンクリートの応力-歪関係に与える影響に関する研究

河野 進<sup>1</sup>・梶谷 昌弘<sup>2</sup>・西山 峰広<sup>3</sup>・渡辺 史夫<sup>4</sup>

1	工博	京都大学助手	工学研究科	(〒606-8501	京都市左京区吉田本町)
2	工修	福岡県県庁		(〒812-0045	福岡市博多区東公園7-7)
3	工博	京都大学助教授	工学研究科	(〒606-8501	京都市左京区吉田本町)
4	工博	京都大学教授	工学研究科	(〒606-8501	京都市左京区吉田本町)

Dynamic compression test has been carried out on 126 cylinder specimens with different compressive concrete strength, amount and yield strength of confining spirals in order to study strain rate effects on the stress-strain relation of confined concrete. In this paper, peak axial stress and peak axial strain are focused and experimental results on those variables are compared with the existing models. It was found that the existing models had difficulties predicting those quantities when the specimen has concrete compressive strength as large as 50MPa, amount of confining spiral volume ratio as large as 1.8%, or strain rate as fast as 0.1/s.

**Key Words:** Confinement, strain rate, peak stress, peak strain, confining stress

## 1. はじめに

横補強筋により拘束を受けるコンクリートの静的載荷条件下の軸応力-軸歪関係については、例えばDesayi等<sup>1)</sup>、Park等<sup>2)</sup>、渡邊等<sup>3)</sup>、Mander等<sup>4)</sup>、Fafitis等<sup>5)</sup>により現在までに多くの研究がなされている。この結果、横補強筋の形状・体積比・降伏強度及び無拘束コンクリートの圧縮強度が、拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に与える影響は次第に明らかにされ、拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係を表すモデルも多数提案されている。しかし、それぞれの研究者が提案する軸応力-軸歪関係モデルはそれぞれの実験結果にはよく適合するが、異なる実験結果への適合はまだ難しく、研究の余地が残されている。

また、これらの実験では準静的な載荷方法を用いているため、歪速度が軸応力-軸歪関係に与える影響は明らかになっていない。しかし、コンクリートや鉄筋の力学的特性がひずみ速度に伴って変化すれば、部材の抵抗機構や破壊性状が静的状態の場合と異なる場合も生じ、静的実験や解析の結果を動的挙動の予想には用いることが出来ないこととなる。例えば、静的実験結果を基に設計された部材において載荷を高速で行った

結果、部材の曲げ強度のみが上昇して、曲げ破壊する前に脆性的なせん断破壊が生じるなどの現象が考えられる。拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に与える歪速度の影響は1980年代から、Ahmad等<sup>6)</sup>、Dilger等<sup>7)</sup>、Soroushian等<sup>8)9)</sup>、Mander等<sup>10)11)</sup>により研究が行われている。しかし、最大軸応力やその時の歪の増加率影響因子については研究者により意見の相違がある。また、載荷中の横拘束の程度がどのように変化したかについてはこれまでほとんど報告されておらず、上記の物理量の増加が拘束の増加によるものか歪速度に依存するものなのか明らかでない。

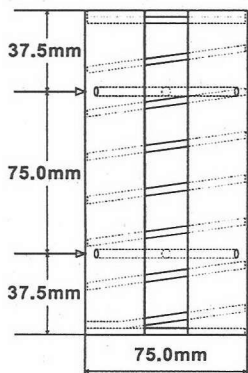
本研究は、歪速度が拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に与える影響を、スパイラル筋で拘束されたコンクリートシリンダーを用いた実験で定量化しモデル化を行うことを目的とするが、特に以下の点に着目するものとする。

1. 無拘束コンクリート圧縮強度、歪速度、拘束の程度及び寸法を実験変数として、これらの物理量が拘束コンクリートの軸応力-軸歪関係に与える影響を定量化すること。
2. 実験時の横拘束力の変化を、拘束筋として用いたスパイラル筋の伸び歪から算出し、動的載荷条件下の拘

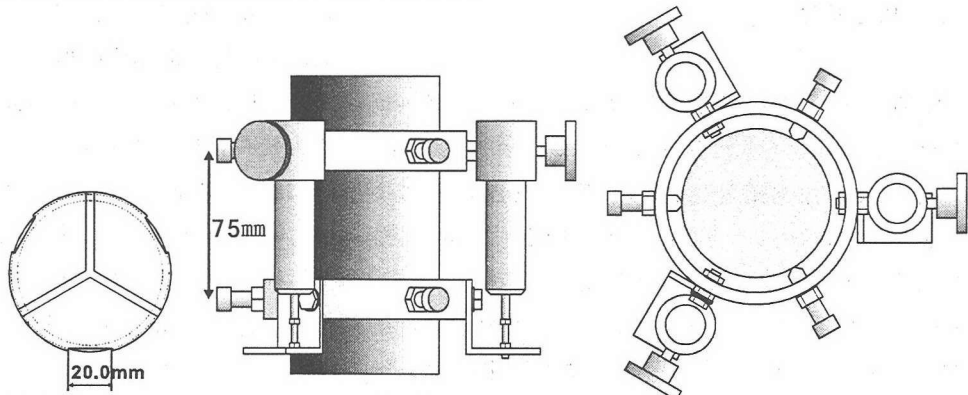
表-1 2000年度に行われた試験体の名称, 実験変数, および主な実験結果

名称			実験変数				実験結果				
セット名	シリーズ名	試験体数	コンクリート強度 (MPa)	拘束用スパイラル筋		設定歪速度 (1/s)	平均歪速度 (1/s)	平均最大軸力 (MPa)	平均最大軸力の歪感度 $\alpha$	平均最大軸力の歪 (%)	平均最大軸力の歪感度 $\beta$
				公称降伏強度 (MPa)	鉄筋量 (%)						
32N0	32AN0	3	31.8	None	None	4.80E-05	4.94E-05	31.8	1.00	0.238	1.00
	32BN0	2				1.30E-03	1.67E-03	33.1	1.04	0.251	1.05
	32CN0	3				1.30E-02	2.61E-02	35.5	1.11	0.235	0.99
	32DN0	2				1.30E-01	1.48E-01	41.7	1.31	0.291	1.22
32H1	32AH1	2		850	0.90	4.80E-05	4.78E-05	44.0	1.00	2.029	1.00
	32CH1	3				1.30E-03	1.34E-03	45.5	1.03	1.859	0.92
	32AH1	3				1.30E-02	1.45E-02	45.4	1.03	1.637	0.81
	32CH1	3				1.30E-01	1.71E-01	47.7	1.09	1.296	0.64
32H2	32AH2	2		1.81	850	4.80E-05	4.85E-05	81.6	1.00	3.298	1.00
	32BH2	2				1.30E-03	1.32E-03	78.7	0.96	3.165	0.96
	32CH2	3				1.30E-02	1.37E-02	80.0	0.98	2.955	0.90
	32DH2	3				1.30E-01	1.47E-01	76.8	0.94	3.314	1.00
32L1	32AL1	3	300	0.97	3.50E-05	4.81E-05	38.3	1.00	0.811	1.00	
	32CL1	3			1.34E-02	1.72E-02	40.9	1.07	0.696	0.86	
54N0	54AN0	5	54.8	None	None	4.80E-05	4.86E-05	54.8	1.00	0.286	1.00
	54BN0	3				1.30E-03	1.49E-03	55.3	1.01	0.250	0.87
	54CN0	3				1.30E-02	1.90E-02	59.9	1.09	0.297	1.04
	54DN0	3				1.30E-01	1.32E-01	64.9	1.18	0.341	1.19
54H1	54AH1	3		850	1.81	4.80E-05	4.78E-05	69.1	1.00	0.502	1.00
	54BH1	3				1.30E-03	1.47E-03	71.1	1.03	0.406	0.81
	54CH1	3				1.30E-02	1.87E-02	80.1	1.16	0.347	0.69
	54DH1	3				1.30E-01	1.58E-01	85.1	1.23	0.443	0.88

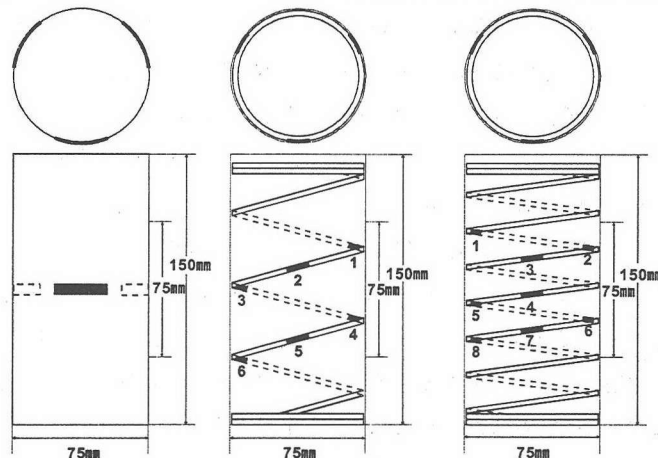
注: 1999年度の実験について同様の表が文献12に掲載されている。



(a) 試験体寸法



(b) 変位計による軸方向歪測定



(c) 3種類の拘束と横歪用ゲージ位置

図-1 試験体図

束コンクリートの軸応力-軸歪関係に関わる様々な物理量の変化が、歪速度に依存するものか拘束量の変化に依存するものかを明らかにすること。

3. 歪速度の変化により、破壊や損傷の形態にどのような変化が生じるかを観察すること。

## 2. 実験概要

図-1(a)に示すのは、 $\phi 75\text{mm} \times 150\text{mm}$ の円柱形試験体である。全試験体の内部には、軸方向変形を計測するため供試体上端または下端から37.5mmの位置に三つまたの鉄製治具が2個埋め込まれている。三つまたの先端には穴があいており、図-1(b)に示す軸方向変形を計測する3本の変位計の取付け治具を固定するた

めのボルトがこの穴にねじ込めるようになっている。本論文では、このようにして取り付けられた3本の変位計で得られた伸びの平均値を検長さ75mmで除して得られた値を軸歪として用いる。図-1(c)には、無拘束の試験体と2種類の異なる拘束量を持つスパイラル筋およびこれらに添付した歪ゲージの位置が示されている。拘束量が異なるスパイラル筋のピッチはそれぞれ20mm及び40mmである。横拘束スパイラル筋は、高強度鉄筋(直径2.9mm, 引張降伏強度855MPa)及び普通強度鉄筋(直径3.0mm, 引張降伏強度300MPa)の2種類を用いた。载荷には動的500kNサーボアクチュエーターを用い、3本の変位計の伸びの平均を帰還信号とする変位制御で実験を行った。

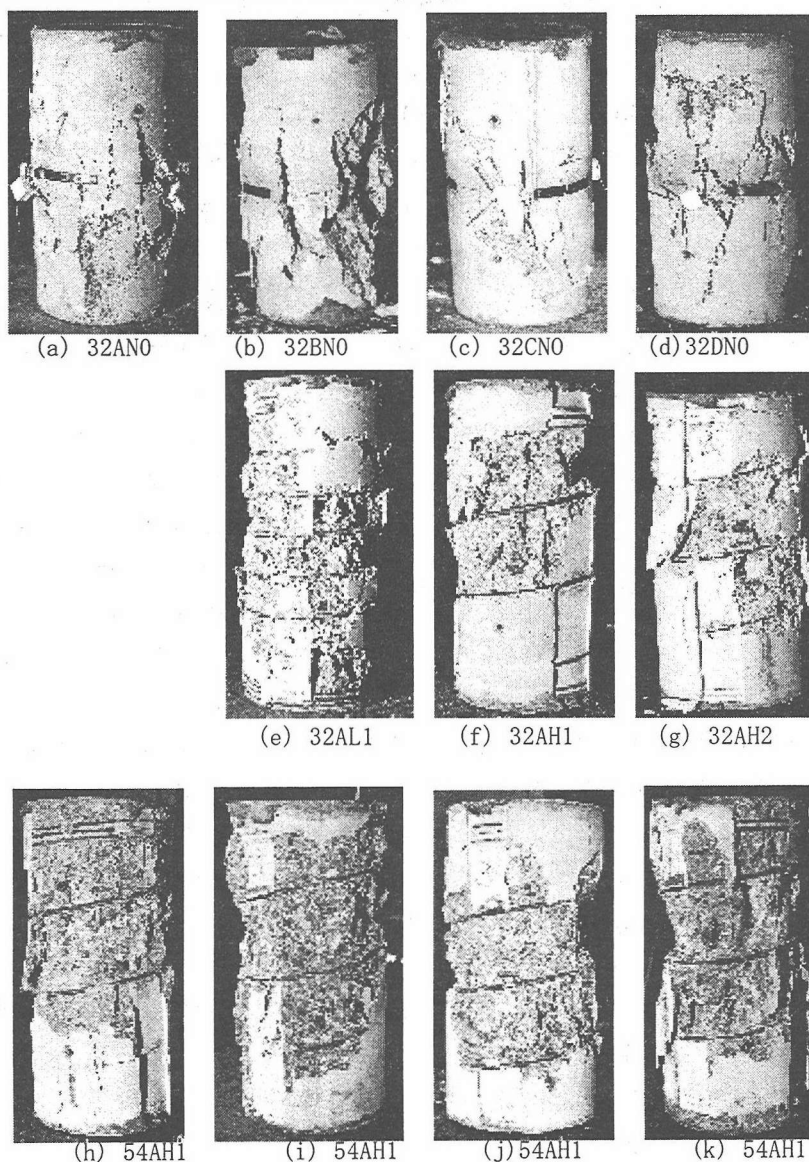


図-2 典型的な破壊性状

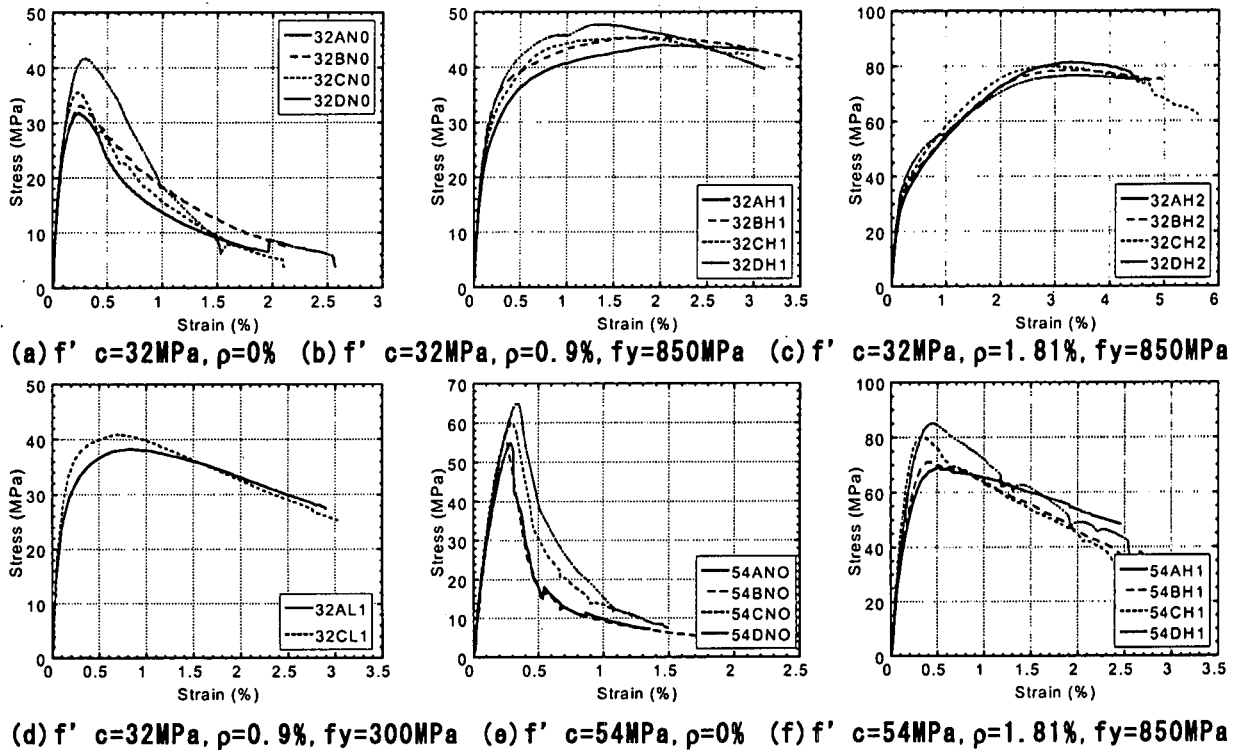


図-3 実験変数の組み合わせが同じ試験体の平均軸応力-平均軸歪関係

表-1に示す通り、実験変数はコンクリート強度2種類(32MPa, 54MPa)、拘束用スパイラル筋の降伏強度2種類(850MPa, 300MPa)および鉄筋量3種類(体積比で0%, 0.9%, 1.8%)、歪速度4種類(4.8E-5/s, 1.3E-3/s, 1.3E-2/s, 1.3E-1/s)の4項目である。各変数の組み合わせに対して表に示すように複数本の試験体を用意し、総数63体のシリンダーについて実験を行った。昨年度の試験体<sup>12)</sup>63体と合わせると試験体総数は2年間で126体となる。

### 3. 破壊性状

図-2に、本年度載荷を行った63体の試験終了後の写真から代表的な実験変数の組み合わせのものを無作為に選んで示す。どの試験体も大きな偏心がなく75mmの検長領域内を主な破壊領域として圧縮破壊していることが分かる。昨年度の試験体には、ほぼ45度に傾斜したせん断面が試験体を横切るようにして破壊したものが数体あったが、本年度のものでこうした極端な破壊性状は観察されなかった。Mander等によると、拘束量が体積比0.6%程度の低い拘束量の円形試験体ではせん断破壊が特徴的であったことが報告されているが本年度の実験ではこうした特徴は観察されなかった。

### 4. 応力-歪曲線

図-3には、実験変数の組み合わせが同じ複数の試験体の軸応力-軸歪関係を平均化した曲線を示す。同じグラフの中に示す異なる曲線は、拘束量が同じで歪速度のみが異なる試験体シリーズの平均を示す。各々の図の中では曲線の形が良く似ていることから、同じ拘束量ならば歪速度が変化しても軸応力-軸歪関係の形は似たものになることが分かる。しかし、どの図においても歪速度が増加するに従い最大軸応力の点がシフトするので、このシフト量に関しては次章において定量的に議論する。また、グラフを(a), (b), (c)の順にまたは(e), (f)の順に同じ歪速度のグラフを比較してみると、拘束量が増加するに従い最大軸応力とそのときの歪が増加し、曲線が囲む面積つまり消費エネルギーが増加するのは歪速度の大小に関わらず静的な実験結果と同様の傾向である。

### 5. 最大軸応力度およびそのときの歪に関する歪感度

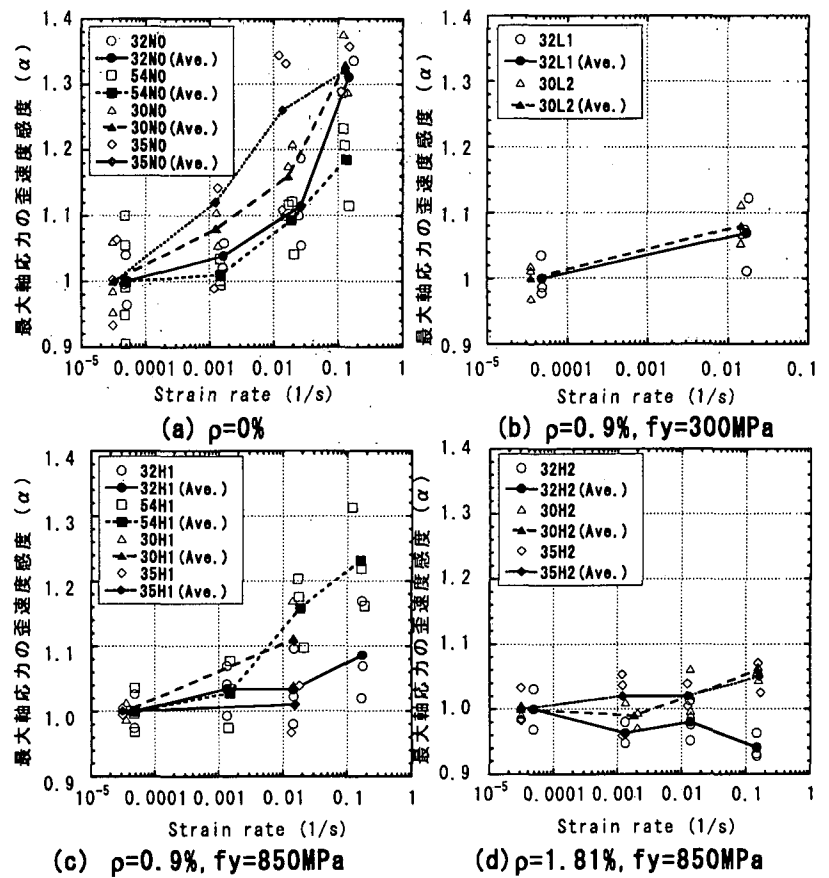
軸応力-軸歪関係の予想は、まず1)拘束効果や動的効果によるピークの応力と歪を予想すること、2)これ

らの値と無拘束・静的な場合のピークとの差に基づいて曲線の形を決めることの手順で決めることができる。ピーク値の予想には様々な方法が提案されており、予想が大きく異なるものも有る。しかし、一旦ピーク値が決定されると、予想方法は異なっても曲線の概形はそれほど異なったものとはならない。そこで、本論分ではピーク時の応力および、歪に焦点を当てて議論を進める。

まず、本実験において応力-歪曲線のピーク点が歪速度と拘束量の影響を受けてどのように変化したかを説明する。拘束量が等しく歪速度が一番遅い試験体(昨年度では $3.1E-5/s$ , 本年度では $4.8E-5/s$ )のものを静的試験と考え、静的試験におけるピーク時の応力および歪の平均値を基準値と定義する。拘束量が等しい試験体の最大軸応力を基準応力値で除した値を最大軸応力の歪速度感度 $\alpha$ とする。また、最大軸応力時の歪に関しても同様にして基準歪値で除した値を最大軸応力時歪の歪速度感度 $\beta$ と定義する。 $\alpha$ と $\beta$ の値は、表-1に示す通りである。拘束量が等しい試験体の $\alpha$ および $\beta$ が歪速度によってどのように変化するかを図-4、および図-5に示す。なお図には昨年度と本年度の実験結果を合わせて示している。

図-4(a)では、無拘束コンクリートの歪速度感度 $\alpha$ は、コンクリート強度に関わらず歪速度に伴って大きくなるのが分かる。この傾向は、比較的拘束力が小さい図-4(b), 図-4(c)でも観察されるが $\alpha$ の上昇量は小さくなっている。拘束量を2%とした図-4(d)では、歪速度が上昇しても感度 $\alpha$ の値はほとんど変化していない。

図-5(a)に示す無拘束コンクリー



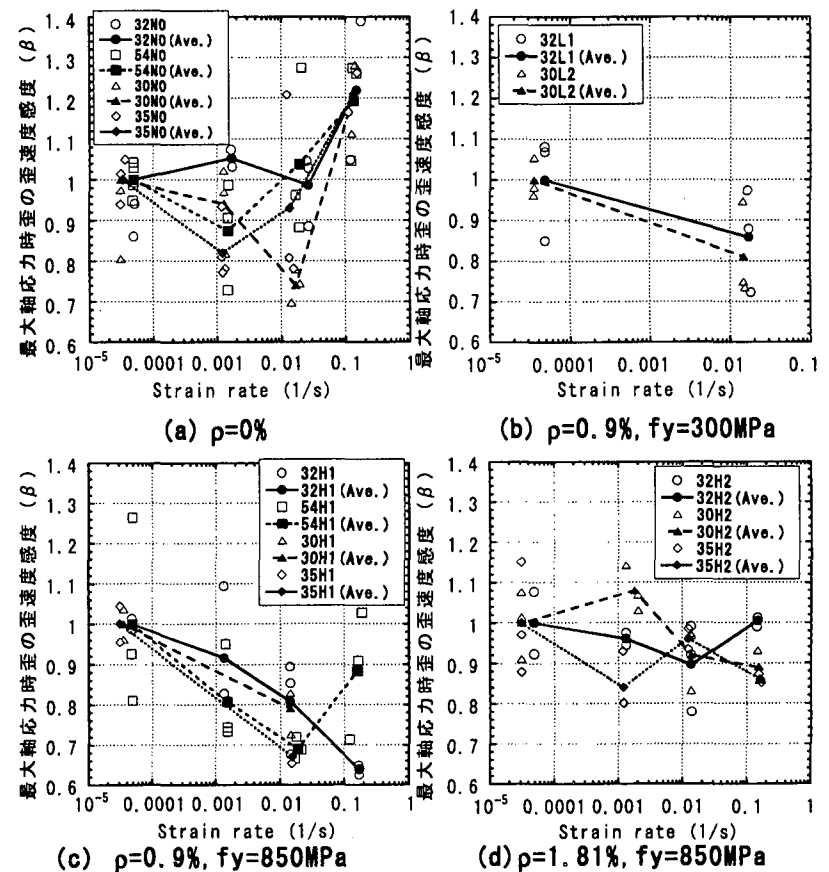
(a)  $p=0\%$

(b)  $p=0.9\%, f_y=300\text{MPa}$

(c)  $p=0.9\%, f_y=850\text{MPa}$

(d)  $p=1.81\%, f_y=850\text{MPa}$

図-4 平均最大軸応力の歪速度感度 $\alpha$



(a)  $p=0\%$

(b)  $p=0.9\%, f_y=300\text{MPa}$

(c)  $p=0.9\%, f_y=850\text{MPa}$

(d)  $p=1.81\%, f_y=850\text{MPa}$

図-5 平均最大軸応力時歪の歪速度感度 $\beta$

トの歪速度感度 $\beta$ は、歪速度が静的から0.01/s程度にかけて上昇する従って一旦減少し、この後は上昇に転じている。しかし、図-5(c)に示す拘束量0.9%の試験では減少や上昇の程度が減り、図-5(d)に示す拘束量1.8%の試験では歪速度の上昇に伴う感度 $\beta$ はほぼ一定値に近づいている。

## 6. 既存のモデルによる $\alpha$ および $\beta$ の予想

図-4および図-5に示す実験結果を既存のモデルで予想した。用いたモデルはAhmad等<sup>1)</sup>、Dilger等<sup>2)</sup>、Soroushian等<sup>3)4)</sup>、Mander等<sup>5)6)</sup>によるものである。どのモデルも実験結果を全般に渡って精度良く予想したものはなかったが、Manderによるモデルは中でも一番精度良く本実験結果を予想していたと思われる。しかし、Manderによるモデルを用いても1)本年度用いた50MPa程度の比較的高強度のコンクリートに対する予想、2)歪速度が0.1に達するような比較的高速度の歪速度に対する予想、3)拘束量が体積比で2%に達するような比較的高い拘束量に対する予想、の3つについてうまく対応出来ないことが分かった。Manderの予想式はエネルギー原理に基づいている理論式であり、適用範囲はManderが検証に用いた実験に限られるものではないが、やはり検証外の実験変数に対しては余り精度がよくないことが分かった。

## 7. まとめ

拘束コンクリートの応力歪関係が歪速度の影響を受けてどの程度変化するかを126体のシリンダー試験体の静的および動的載荷実験から定量的に確かめた。この結果、Mander等が提案したモデルの適用性が最も良かったが改良するべき点があることが判明した。本論文は現象論的にピーク時の応力と歪について論じているが、測定したスパイラル筋の歪の変化等に立脚した損傷のメカニズムを考慮した応力-歪関係のモデル化を進める予定である。

## 謝辞：

本研究は、科学技術振興調整費地震防災・破壊メカニズム研究プロジェクトにおける「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一部として行われたものである。なお、実験にあたっては、京都大学4回生・杉本尚之君に多大なる協力を得ましたのでここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Parakash, C., Desayi, Sundara Raja Iyengar, K.T. and Sanjeeva Reddy, T., "Equation for Stress-Strain Curve of Concrete Confined in Circular Steel Spiral", *Materiau et Constructions*, Vol.11, No.65, Sept./October 1978, pp. 339-345.
- 2) Park, R. and Leslic, P.D., "Curvature Ductility of Circular Reinforced Concrete Columns Confined by the ACI Spirals", 6th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Vol.1, Technical Papers, Christchurch, New Zealand, August 1977, pp. 342-349.
- 3) Watanabe, F., Muguruma, H., Tanaka, H. and Katsuda, S., "Improving the Flexural Ductility of Prestressed Concrete Beam by Using the High Yield Strength Lateral Hoop Reinforcement," FIP Symposia on Partial Prestressing and Practical Construction in Reinforcement Concrete, proceedings, Part 2, Sept. 1980, Bucuresti-Romania, pp. 398-406.
- 4) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, August 1988, pp. 1804-1826.
- 5) Fafitis, A. and Shah, S.P., "Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns," SP-87-12, ACI, Detroit, 1985, pp. 213-233.
- 6) Ahmad, S.H. and Shah, S.P., "Behavior of Hoop Confined Concrete Under High Strain Rates," *ACI Journal*, Vol.82, No.5, Sep-Oct. 1985, pp. 634-647.
- 7) Dilger, W.H., Koch, R., and Kowalczyk, R., "Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates", *ACI Journal*, Vol.81, No.1, Jan-Feb. 1984, pp. 73-81.
- 8) Soroushian, P., Choi, K-B., and Alhamad, A., "Dynamic Constitutive Behavior of Concrete," *ACI Journal*, Vol.83, No.2, Mar-Apr. 1986, pp. 251-259.
- 9) Soroushian, P. and Sim, J., "Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns under Dynamic Loads," *ACI Journal*, Vol.83, No.6, Nov-Dec. 1986, pp. 1018-1025.
- 10) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, August, 1988, pp. 1804-1826.
- 11) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Observed stress-strain behavior of confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, August, 1988, pp. 1827-1849.
- 12) 河野進, 藤井栄, 西山峰広, 渡辺史夫: 鉄筋コンクリート部材の損傷評価, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, 2000年3月, pp. 179-184.