

論文 鉄筋コンクリート柱部材の挙動に及ぼすひずみ速度の影響に関する実験的研究

金子 貴司^{*1}・田上 淳^{*2}・丸田 誠^{*3}・鈴木 紀雄^{*3}

要旨: 鉄筋コンクリート柱部材の地震時水平復元力特性に及ぼすひずみ速度の影響を把握するために、載荷速度(動的, 静的), せん断スパン比(1.2, 1.8)及び軸力比(0.1, 0.3, 0.3±0.2)を実験変数とした逆対称載荷実験を行なった。動的載荷波形は、最大部材角速度0.1rad/secの漸増正弦波とし、静的載荷では時間軸を1000倍して入力した。実験の結果、曲げ降伏した試験体では曲げ降伏強度が6.9~9.5%, せん断破壊した試験体では最大強度が11.3%上昇した。また、等価粘性減衰定数は小振幅領域で動的載荷の方が静的載荷より大きな値を示した。なお、破壊形式については静的載荷と動的載荷で差異はなかった。

キーワード: ひずみ速度, 鉄筋コンクリート部材, 柱, 曲げ, せん断, 変形能力

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱部材に及ぼすひずみ速度の影響に関しては、曲げ降伏強度や最大強度が上昇することが既往の研究で明らかになっている(例えば¹⁾)。しかし、破壊形式や変形能力およびエネルギー吸収能力に及ぼす影響等については、既往研究間で評価が分かれる部分があり、共通認識を得るに至っていない。

そこで、上記諸特性に及ぼすひずみ速度の影響を把握するために、鉄筋コンクリート柱部材を対象とした逆対称載荷による動的及び静的載荷実験を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元, 使用材料の力学的性質を表-1に、試験体の形状及び配筋を図-1に示す。

試験体は、試験区間の両端に加力スタブを有する縮尺1/3の柱模型8体である。試験体の断面(250×250mm)及び配筋(8-D13, 2-D6@50)は全試験体で共通である。D-1, D-2, D-3, D-4試験体は動的載荷とし、S-1, S-2, S-3, S-4試験体は静的載荷とした。実験変数は、載荷速度(動的, 静的), せん断スパン比(1.2, 1.8)及び軸力比(0.1, 0.3, 0.3±0.2)であり、動的載荷と静的載荷を一对として

表-1 試験体諸元及び材料特性

	D-1	S-1	D-2	S-2	D-3	S-3	D-4	S-4
断面 (mm×mm)	共通 250×250 (幅×せい)							
主筋 (σ_y :N/mm ²)	共通 8-D13, SD345 (390.6), Pg=1.62%							
横補強筋 (σ_{wy} :N/mm ²)	共通 2-D6@50, SD295 (399.9), Pw=0.51%							
せん断スパン比	1.8		1.8		1.2		1.8	
軸力比 N/bDFc ^{*1}	0.1		0.3		0.3		0.3±0.2	
コンクリート強度(N/mm ²)	29.6	29.4	29.7	29.9	30.7	31.3	30.9	31.4
ヤング係数(×10 ³ N/mm ²)	26.2	27.4	27.2	27.6	27.5	26.7	27.0	27.8
曲げ降伏強度計算値(kN) ^{*2}	123		164		246		174	
せん断強度計算値(kN) ^{*3}	158		158		158		158	
せん断余裕度 ^{*4}	1.37		1.00		0.67		0.96	

*1 Fc=27.2N/mm²として計算。軸力比0.1では170kN, 軸力比0.3では510kNとした。*2 ファイバー解析による。*3 文献2によるせん断強度 *4 せん断余裕度=(文献2によるRp=0.01とした時のせん断強度)/(曲げ降伏強度計算値)

*1 鹿島建設 技術研究所 建築構造グループ 修士(工学) 研究員(正会員)

*2 鹿島建設 技術研究所 建築構造グループ 工修 上席研究員

*3 鹿島建設 技術研究所 建築構造グループ 工博 上席研究員(正会員)

他の条件を設定した。

2.2 加力方法

載荷装置を図-2に示す。加力フレームの内側に設置したスライド装置に試験体を固定し、所定の軸力を導入した後、動的水平アクチュエータにより繰り返し水平変位を加えた。水平アクチュエータの制御は、水平スライド装置と試験体上部の加力ブロック間の相対水平変位により行なった。また、鉛直方向にも動的アクチュエータを用い、軸力を動的に制御した。

載荷波形は図-3に示す様な漸増正弦波を原則とし必要に応じて加力ステップを増加した。

一次振動モードが卓越し、且つ、各層の重量が等しい6層(階高3.3m, 高さ20m)の建物を想定した。部材角速度は、以下の算定法により求めた。50kine に基準化した EL Centro 波及び Taft 波の加速度は、500gal 程度であり、梅村スペクトル³⁾を参考にすると、 $S_v=144\text{cm/sec}$ となる。また、この建物の一次の刺激係数 β は、 $\beta=3/(2n+1)$ (n :階数)であるから、層間変形速度は 33.2cm/sec となる。従って、実験での部材角速度を 0.1rad/sec とした。また、想定建物の固有周期を 0.4 秒とし、部材角振幅 $R=1/800, 1/400, 1/200, 1/100$ では、載荷周波数を 2.5Hz 一定とし、以後、速度振幅一定となるように周波数を低減させるものとし、 $R=1/50$ では 1.2Hz 、 $R=1/25$ では 0.6Hz 、 $R=1/16$ では 0.4Hz とした。載荷の途中でひび割れ観察及び写真撮影等を行なうために、載荷波形を4~6つに分割して実験を行なった。各載荷の開始と共に、停止しているアクチュエータが急激に動きだすが、載荷の開始直後から安定した速度で加力することは困難である。そこで、安定した速度で載荷するために、試験体が未経験振幅での載荷を行なう直前に、過去に経験したことのある最大振幅による載荷を1サイクルだけ補助の載荷として行なった。そのため、補助の載荷を含めて、同一振幅での繰り返しは3回となる。

D-4 と S-4 試験体では、以下に示す計算法により、図-4に示す変動軸力の時刻歴を作成し、変動軸力実験を行なった。一次振動モードが卓

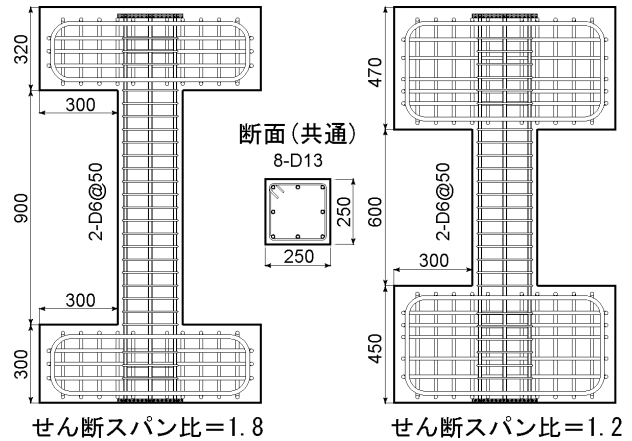


図-1 試験体形状及び配筋

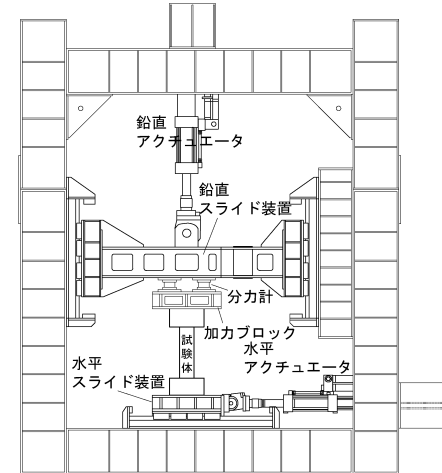


図-2 載荷装置図

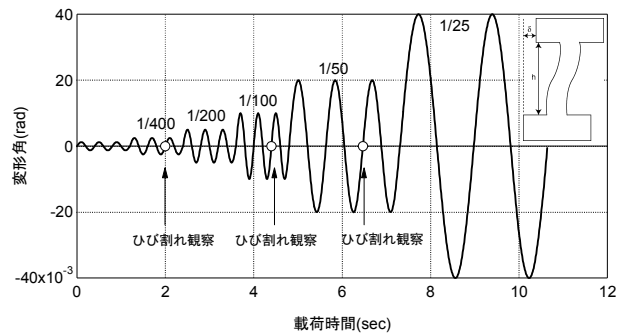


図-3 載荷履歴 (水平変形)

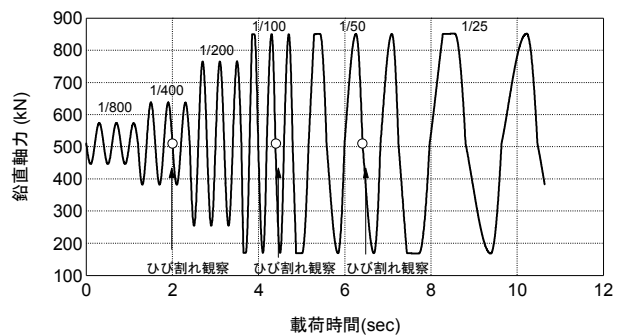


図-4 軸力変動履歴 (D-4)

越すると想定した場合、梁降伏先行型の骨組みでは、層の復元力特性に梁の復元力特性が反映される。外柱の軸力変動は梁のせん断力に起因

するものなので、柱軸力の変動分と水平変形の関係は層の復元力特性と相似となり、**図-5**の様な Clough モデル⁴⁾で表されるものとし、軸力比 0.1~0.5 の間で変動させた。また、水平正方向荷重時に軸力を減少させる方向へ、水平負方向荷重時に軸力を増加させる方向へ変動させた。

実験は、動的荷重実験を先に実施し、得られた水平変位および軸力の計測データの時間軸を 1000 倍した波形を作成し、対応する静的荷重実験用の入力波とした。これにより、一対の動的荷重と静的荷重で、荷重条件を高い精度で一致させることができた。

試験体に作用する水平力及び軸力は、上部に取付けた 4 基の分力計により検出した。データの取込みには、A/D 変換器付き PC 及び動ひずみ測定器を用い、サンプリング周波数は、動的荷重で 500Hz、静的荷重で 1.0Hz とした。

3. 実験結果

3.1 実験の精度

動的荷重時の荷重速度の実験値と設定値の比を**図-6**に示す。荷重は正弦波であるので、各荷重の連続する正負の振幅値のピークを結んだ傾きを荷重速度と定義した。部材角振幅 $R=1/800$ 及び $1/400$ の荷重の実験値は、設定した荷重速度の 80~90%程度であるが、 $R=1/100$ 以降の荷重の実験値は、設定した荷重速度が得られている。

一定軸力を想定した D-1, D-2, D-3 試験体では、動的アクチュエータにより軸力を動的に制御することにより、 $\pm 30\text{kN}$ 程度の軸力変動（軸力比換算で約 ± 0.018 の変動）に留めることができた。また、変動軸力試験体 D-4 でも軸力の設定値と実験値は、両者が良く一致した。今回、軸力の制御に動的アクチュエータを使用することで、高精度な軸力の制御を実現することができた。

3.2 破壊形式

曲げ破壊を生じた D-2 及び S-2 試験体の $R=1/25\text{rad}$ 荷重後の状況を**写真-1**に示す。D-3, S-3 以外の試験体では、ほぼ同様に、上下端の曲げ破壊が観察されており、動的荷重と静的荷重

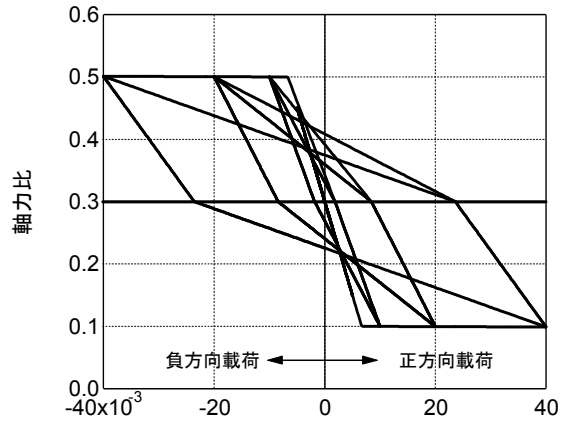


図-5 水平変形と変動軸力の関係

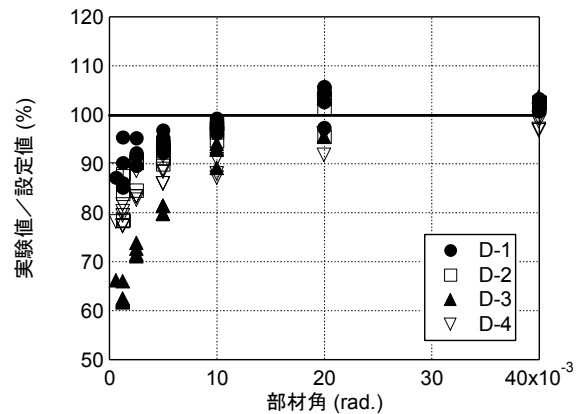
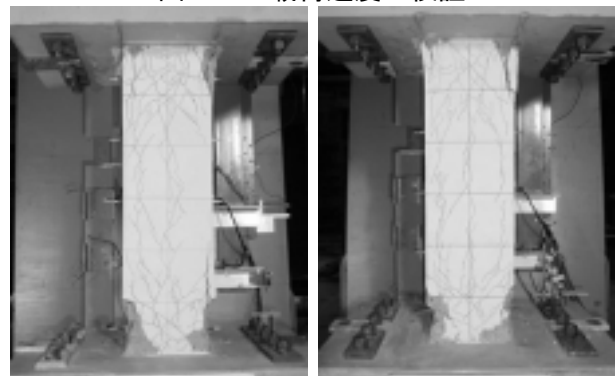


図-6 荷重速度の検証



D-2 試験体 **S-2 試験体**
写真-1 破壊状況 ($R=1/25$ 荷重終了後)

で破壊状況に顕著な差は認められなかった。

以下、代表的な曲げ破壊を生じた D-2 試験体の破壊経過を述べる。部材角 $R=1/400$ の荷重で試験体危険断面部分に曲げひび割れが発生した。 $R=1/100$ の荷重ではせん断ひび割れが発生し、主筋の降伏が確認された。 $R=1/50$ の荷重では試験体隅角部のコンクリートが剥落し、試験体の主筋に沿って付着割裂ひび割れが発生した。 $R=1/25$ の荷重で、試験体隅角部において大規模なコンクリート剥落が見られ、 $R=1/16$ の荷重で、横補強筋の 135 度フックが開き、崩壊に至った。

表-2 実験結果一覧

	D-1	S-1	D-2	S-2	D-3	S-3	D-4	S-4
初期剛性(kN/mm) ^{*1}	77.9	75.1	87.7	84.1	212.6	205.3	84.1	80.0
曲げ降伏強度(kN)	145	136	193	177	—	—	187	170
曲げ降伏変形(rad)	1/68	1/68	1/128	1/109	—	—	1/105	1/89
最大強度(kN)	148	137	193	179	271	244	191	173
最大強度時変形(rad)	1/43	1/30	1/123	1/74	1/119	1/108	1/56	1/54
最大変形角(rad.) ^{*2}	1/24	1/17	1/26	1/25	1/50	1/56	1/34	1/34
破壊モード ^{*3}	F	F	F	F	S	S	F	F

*1 曲げひび割れ強度計算値の1/2以下における荷重-変形関係の近似直線 *2 最大耐力の80%に低下した点 *3 F: 曲げ破壊, S: せん断破壊

一方、せん断スパンの小さいD-3及びS-3試験体では、いずれもR=1/100の荷重近傍においてせん断ひび割れの発生とともに急激な耐力低下が見られ、R=1/50の荷重では試験区間の中央部分において、コンクリートの剥落が見られた。さらに、R=1/25の荷重では横補強筋の135度フックが開き、軸力を保持できなくなり崩壊に至った。この場合も、動的荷重と静的荷重で破壊状況に差は見られなかった。

3.3 荷重-変形関係

実験結果の一覧を表-2に、各試験体の荷重-変形関係を図-7に示す。

動的荷重試験体と対応した静的荷重試験体について正負の曲げ降伏強度を平均して比較するとD-1試験体では6.9%、D-2試験体では8.8%、D-4試験体では9.5%それぞれ静的試験体よりも上昇している。また、せん断破壊したD-3試験体では、最大強度の正負の平均値を比較すると対応する静的試験体より11.3%上昇している。

静的荷重では、軸力比が0.1から0.3に増加すると曲げ降伏強度も30.0%上昇した。動的荷重でも、軸力比が0.1から0.3に増加すると30.8%上昇しており、軸力の増加による、曲げ降伏強度の上昇は、静的荷重と動的荷重で同等であった。

曲げ降伏が先行した試験体の履歴ループは、R=1/25程度の大振幅に至るまで概ね紡錘形であり、動的荷重と静的荷重でループ形状に大きな差は見られない。また、せん断破壊したD-3とS-3試験体の履歴特性にも差異は認められない。

各試験体の水平荷重が最大強度の80%に低下した時の部材角を最大変形角と定義し、表-2

表-3 ひずみ速度を考慮した曲げ降伏強度

	S-1	S-2	D-1	D-2
計算値(kN)	123	159	135	170
実験値(kN)	136	177	145	193
実験値/計算値(%)	110	111	108	113

に示す。これによると、動的荷重と静的荷重で最大変形角に明瞭な差は認められない。

図-7中の●は、試験体の軸崩壊点(軸力保持能力の喪失時)を示している。大半の試験体では、静的と動的で同一加力サイクルにおいて軸崩壊しており、軸崩壊限界変位に及ぼす荷重速度の影響は認められない。なお、軸崩壊時の圧縮軸変形は、材長の0.87~1.1%程度であった。

4. 考察

4.1 曲げ降伏強度の上昇率

曲げ降伏した試験体の降伏強度に及ぼすひずみ速度の影響を評価するために、試験体危険断面位置での主筋のひずみ速度を実験結果から求めた。この結果、主筋が降伏する加力サイクルの荷重ゼロから鉄筋が降伏するまでの平均ひずみ速度は、 $2.86\sim 4.29 \times 10^4 \mu/sec$ であった。

次に、既往の定ひずみ速度実験におけるひずみ速度と降伏点強度の関係式⁵⁾(1)式を用いて、実験で得られた主筋のひずみ速度から、動的荷重における主筋の降伏強度を求めた。

$${}_d\sigma_y = \left(0.9 + 0.05 \cdot \log \left(\dot{\epsilon} \right) \right) {}_s\sigma_y \quad (1)$$

ここに、 ${}_d\sigma_y$: 動的な降伏点応力度、 ${}_s\sigma_y$: 静的な降伏点応力度、 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度(μ/sec)である。この結果、動的荷重による主筋の降伏点強度の上昇率は、13.0~13.2%と算定された。

次に、(1)式より得られた降伏点強度を用いて危険断面のファイバー解析を行ない、曲げ降伏

強度を算定した(表-3)。その結果、ひずみ速度の影響を考慮した曲げ降伏強度は、実験値の108, 113%となった。静的载荷時の計算値は、実験値の110, 111%であり、ひずみ速度の影響を考慮することによって、静的载荷と同じ程度の精度で実験値を推定することができた。

4.2 せん断破壊強度の上昇率

せん断破壊した試験体のせん断強度に及ぼす

ひずみ速度の影響を評価するために、動的载荷時の主筋、横補強筋、コンクリートの材料強度を求める。せん断破壊した1/100の载荷において、荷重ゼロから荷重最大値に達するまでの横補強筋の平均ひずみ速度は、 $8 \times 10^3 \mu / \text{sec}$ であった。(1)式よりせん断破壊時の横補強筋の上昇率は、9.6%である。また、動的载荷時のコンクリートに作用するひずみ速度は、文献1を参考にして、

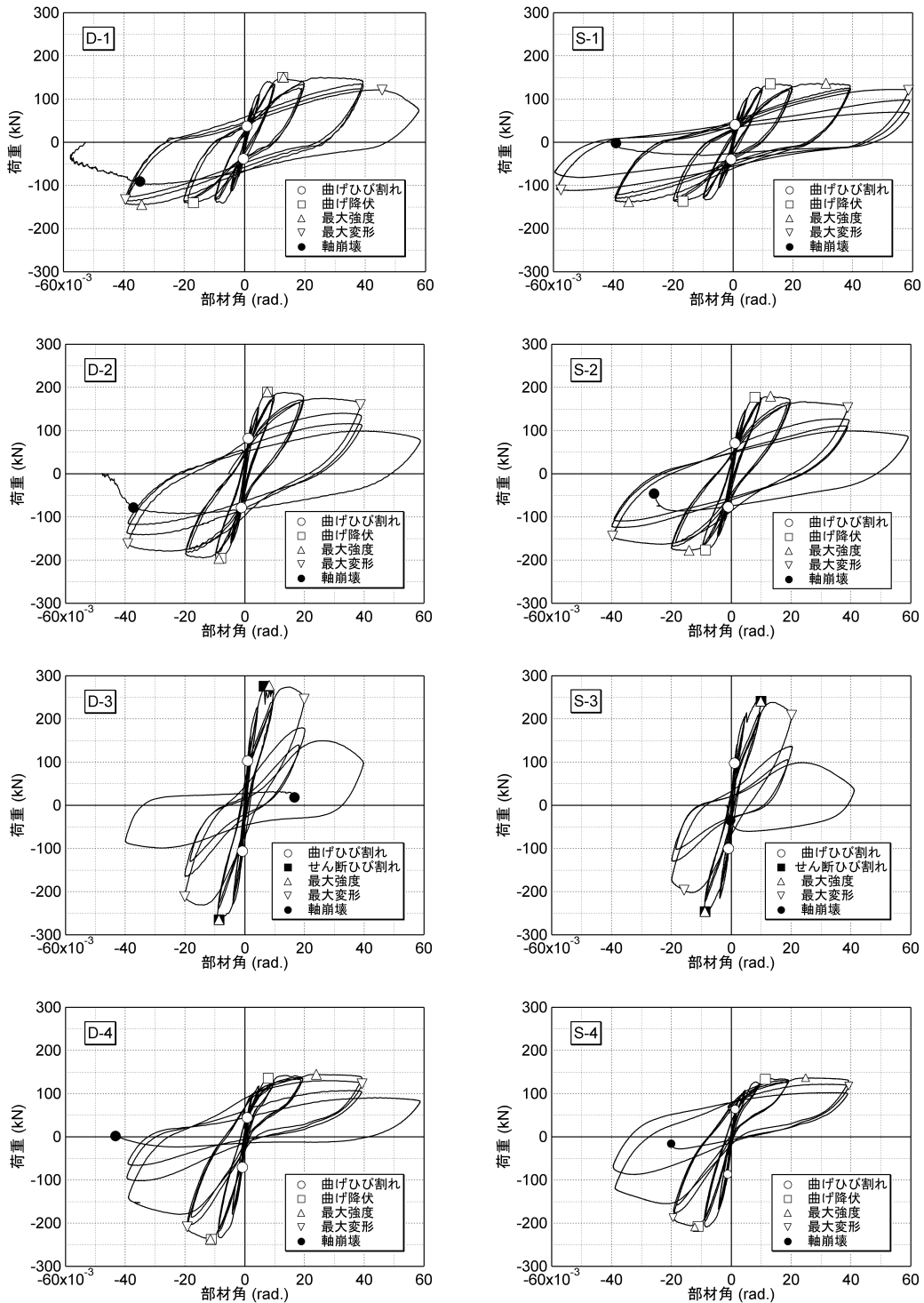


図-7 荷重-変形関係

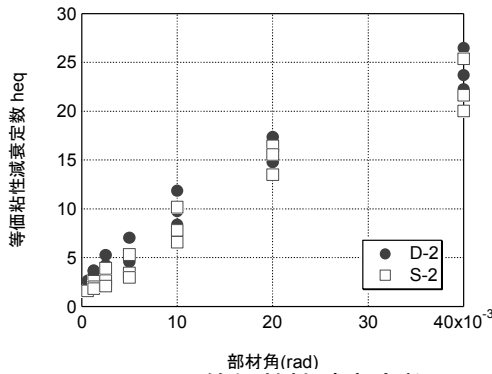


図-8 等価粘性減衰定数

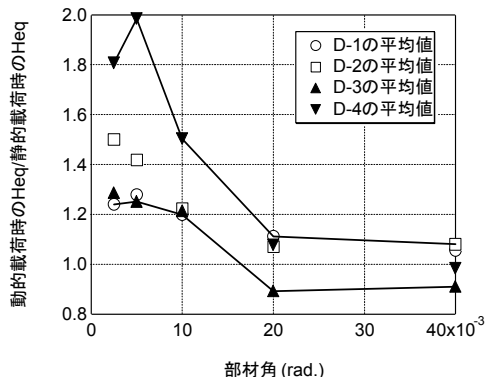


図-9 等価粘性減衰定数の比較

主筋と同じであると仮定すると、 $1.24 \times 10^4 \mu / \text{sec}$ である。既往のコンクリート強度とひずみ速度の関係⁵⁾(2)式からコンクリート強度を求めた。

$${}_d\sigma_B = \left(0.94 + 0.06 \cdot \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\mu / \text{sec}} \right) \right) {}_s\sigma_B \quad (2)$$

ここに、 ${}_d\sigma_B$ ：動的な圧縮強度， ${}_s\sigma_B$ ：静的な圧縮強度， $\dot{\epsilon}$ ：ひずみ速度(μ / sec)である。(2)式より、せん断破壊時のコンクリート強度の上昇は、18.6%である。上昇した材料強度を用いて文献 2 によりせん断強度を求める。その結果、ひずみ速度を考慮することにより、せん断強度計算値は、12.2%の上昇となり、実験での動的載荷による上昇の 11.0%と良く対応している。

4.3 等価粘性減衰定数

D-2 及び S-2 試験体の等価粘性減衰定数と部材角の関係を図-8 に示す。両試験体とも部材角 $R=1/200$ 程度では 5%程度の値を示すが、その後、部材角の増大に伴って等価粘性減衰定数が上昇し、 $R=1/25$ では 20%に達した。

対応する動的載荷と静的載荷の等価粘性減衰定数(同一振幅 3 サイクルの平均値)の比と部材角の関係を図-9 に示す。 $R=1/400$ 又は、 $1/200$ の小振幅では動的載荷時の方が静的載荷より大

きな値を示す。しかし、動的載荷と静的載荷の差は、部材角の増加とともに減少し、曲げ降伏後の $R=1/50$ 以降では動的載荷と静的載荷の差が見られなくなる。

5. 結論

軸力と逆対称曲げを受ける鉄筋コンクリート造柱部材に対する動的載荷(最大部材角速度 0.1 rad/sec 程度)並びに静的載荷実験(動的載荷速度の $1/1000$)を行ない、以下の結論を得た。

- (1) 今回行なった実験の範囲では、同一せん断スパン比・同一軸力条件下では、動的載荷と静的載荷で破壊形式に大きな差は生じなかった。
- (2) 動的載荷により、曲げ降伏強度は静的載荷の場合よりも 6.9~9.5%上昇した。また、せん断破壊強度は 11.3%上昇した。
- (3) 最大変形角の定義を試験体の水平荷重が最大強度の 80%に低下した時の部材角とすると、動的及び静的で差異は見られない。
- (4) 部材角振幅 $1/100$ 以下の小振幅時の等価粘性減衰定数は、動的載荷した試験体の方が静的載荷試験体よりも大きくなる傾向が認められた。一方、大振幅時には動的載荷と静的載荷で顕著な差は見られなかった。
- (5) 動的載荷時の曲げ降伏強度及びせん断強度は、ひずみ速度に関する既往の式により推測した材料の力学的性質を用いることによって、推定することができる。

本研究は、文部科学省が推進している「大都市大震災低減化特別プロジェクト」の一環として行なったものである。

参考文献

- 1) 細矢博ほか：「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, pp.69-77, 1997.2
- 2) 日本建築学会編：「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
- 3) 梅村魁：鉄筋コンクリート建物の動的設計法, 技法堂
- 4) 青山博之：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計法, 技報堂, 1990.8.
- 5) 細矢博ほか：「ひずみ速度の影響を考慮したファイバーモデルによる鉄筋コンクリート部材の断面解析」, 日本建築学会構造系論文集, 第 482 号, pp.83-92, 1996.4.