

[90] 鉄筋コンクリート長柱の挙動に及ぼす載荷速度の影響

正会員 ○ 岩 井 哲 (大阪工業大学短期大学部)  
 正会員 若 林 實 (日本建築総合試験所)

1. 序

本研究は、長柱の弾塑性挙動に及ぼす載荷速度の影響を実験と解析によって調べたものである。地震時に作用すると考えられる程度の歪速度によって鉄筋の降伏強度およびコンクリートの圧縮強度が準静的な強度よりも1~2割程度上昇し、コンクリートは圧縮強度が上昇すると共に初期剛性も上がる<sup>1)</sup>ため、弾塑性の領域で座屈強度に載荷速度の影響することが考えられる。ここでは正方形断面をもつ鉄筋コンクリート柱を、断面せいの6倍・16倍・26倍の3種の材長について、中心圧縮と1軸偏心圧縮の準静的な載荷と動的な載荷を行った実験の結果を述べ、更に、動的な荷重を受ける長柱の挙動を、材料の強度レベルを歪速度に対応して増大したものと仮定する比較的簡単な解析方法で予測する方法を示す。

2. 実験方法

2.1 実験計画 実験変数は、表1に示すように荷重の偏心距離・載荷速度・部材長さの3組をとった。荷重の偏心距離は0(中心圧縮)とD/4(偏心圧縮; Dは断面せい)の2種、載荷速度は材軸方向の準静的な変形速度と動的な変形速度の2種とし、これら4種類の載荷を、図1に示す3種類の部材長さをもつ試験体についてそれぞれ1体ずつに行った。試験体数は全12体である。

加力には動的電気油圧式サーボ試験機を用い、試験体は図2のように両材端部にナイフエッジを用いてピン支持とした。加力は単調の圧縮載荷で、全載荷過程を通じアクチュエータストロークの速度が一定になるように制御し、材軸方向歪速度を準静的には $\dot{\epsilon} = 0.00005 \text{ sec}^{-1}$ 、動的には $\dot{\epsilon} = 0.05 \text{ sec}^{-1}$ となるように設定した。

2.2 試験体 試験体断面は図3のように $b \times D = 60\text{mm} \times 60\text{mm}$ の正方形で、部材長は柱両端部のナイフエッジ回転中心間距離として、 $6D = 360\text{mm}$ 、 $16D = 960\text{mm}$ 、 $26D = 1560\text{mm}$ となっている。主筋は

表1 実験の載荷種別

$\ell$	$\ell/D$	$e/D$	Loading	Specimen Name
36 cm	6	0	Static	S06C
			Dynamic	D06C
		0.25	Static	S06E
			Dynamic	D06E
96 cm	16	0	Static	S16C
			Dynamic	D16C
		0.25	Static	S16E
			Dynamic	D16E
156 cm	26	0	Static	S26C
			Dynamic	D26C
		0.25	Static	S26E
			Dynamic	D26E

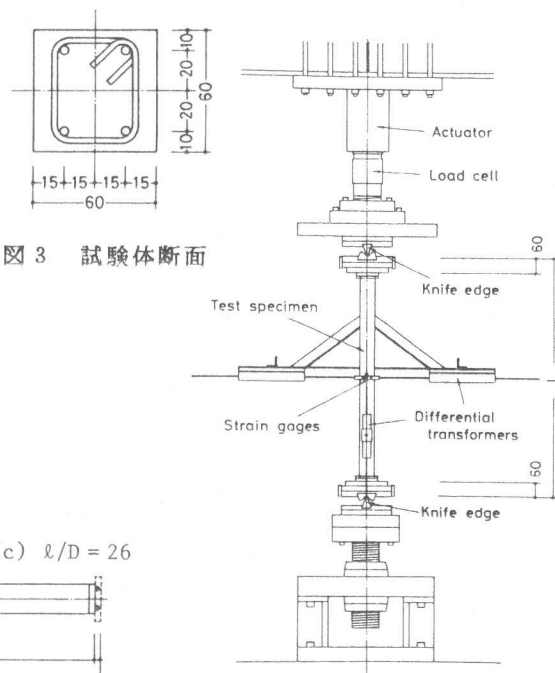


図3 試験体断面

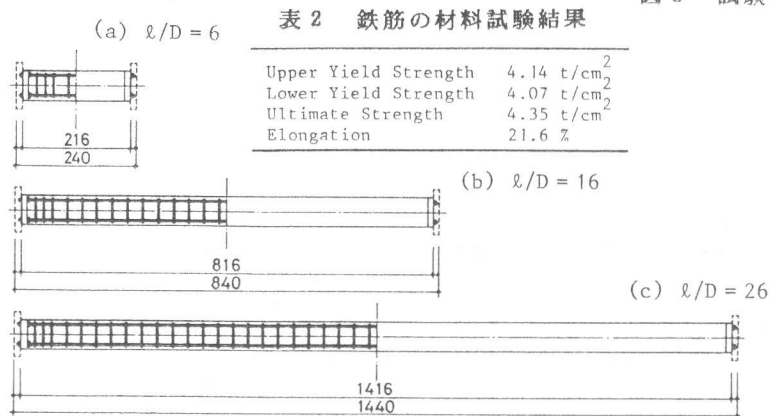


図1 試験体詳細

表2 鉄筋の材料試験結果

Upper Yield Strength	4.14 t/cm <sup>2</sup>
Lower Yield Strength	4.07 t/cm <sup>2</sup>
Ultimate Strength	4.35 t/cm <sup>2</sup>
Elongation	21.6 %

図2 載荷・計測装置

表3 コンクリートの調合・材料試験結果

	$\ell/D=6, 16$	$\ell/D=26$
Compressive Strength	240 kg/cm <sup>2</sup>	286 kg/cm <sup>2</sup>
Strain at Maximum Stress	0.254 %	0.257 %
Tensile Strength	21.3 kg/cm <sup>2</sup>	24.7 kg/cm <sup>2</sup>
Mixing Ratios by Weight	Slump	
Water	0.68	20.5 - 21.0 cm
Cement	1	
Sand	2.45	
Gravel	2.75	

丸鋼 4.5 mmφ を 4 本配し、端部を 16 mm 厚の鋼板の両側でナットによって締め付けて定着した。帯筋は丸鋼 3 mmφ を D/2 = 30mm 間隔で取り付けた。直径の小さい丸鋼は、市販品では降伏点が出にくいことから、焼鈍して明確な降伏点が現れるようにした。主筋の材料試験結果を表 2 に示す。コンクリートは鋼製型枠を用いて水平打設とし、試験体全 12 体を最長部材の 4 体とそれ以外の 8 体の 2 回に分けて作った。コンクリートの調合および材料試験結果を表 3 に示す。試験体はコンクリートの打設 3 日後に脱型し、数日間湿布養生した後、実験日まで空中養生を行った。実験時の材齢は 58 日～64 日であった。載荷実験前の試験体には特に明らかな元湾曲は見られず 0.1～0.2 mm 位の凸凹があった程度である。

2. 3 測定方法 荷重はアクチュエーター先端に取り付けたロードセル

によって検出し、試験体の変形は図 2 のように、試験体をはさんで対称位置に置いた 2 本ずつ 2 組の差動トランスによって、部材の材軸方向変形と部材中央の横方向変形を計測した。差動トランスは、試験体上下端のナイフエッジ回転中心付近で支持された計測用フレームに固定した。また部材中央では、各主筋とコンクリート 4 表面に電気抵抗型歪ゲージをそれぞれ貼付し計測した。歪ゲージの検長は、鉄筋には 1mm、コンクリート表面には 30mm のものを用いた。計測したデータはすべて動歪アンプを通してデータレコーダーに記録し、ペンレコーダーあるいは X-Y レコーダーでモニターおよび再生を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 材軸方向の歪速度 表 4 に示す実現された材軸における歪速度  $\dot{\epsilon}_G$  は、試験体中央におけるコンクリート 2 側面の平均歪の時刻歴の最大荷重付近のデータから読みとったものである。歪ゲージのデータによると、準静的な載荷の場合はほぼ設定値を実現しており、動的な載荷の場合は、D06E を除くと、どの試験体も  $\dot{\epsilon} = 1 \sim 2 \%$  /sec 程度で設定値の 1/3 位であるが、よく揃っている。準静的載荷と動的載荷の速度比は 330～600 倍 ( $\ell/D = 6$  の試験体で偏心載荷の場合では、86 倍) であった。また部材中央のコンクリート最大圧縮縁での歪速度  $\dot{\epsilon}_{G_{max}}$  は、偏心載荷時では  $\dot{\epsilon}_G$  の 5 倍程度となっている。

3. 2 荷重-軸方向変形関係 差動トランスによる軸方向変形  $w$  と荷重  $P$  との関係を図 4 に示す。各図は準静的な載荷結果を実線で、動的な載荷結果を破線で示している。動的載荷の試験体 D16C は、最大荷重直後に載荷が停止し、途中から再載荷を行った。この試験体のみ部材下端部で破壊を生じた。また準静的載荷の結果で、荷重が幅をもった出力となっているのは試験機のフィードバックシステムの関係

表 4 実験結果一覧

$\ell/D$	Specimen Name	$\dot{\epsilon}_G$ (1/sec)	$\dot{\epsilon}_{G_{max}}$ (1/sec)	$P_{max}$ (t)	$\frac{d^* P_{max}}{s^* P_{max}}$	$T_{P=P_{max}}$ (sec)
6	S06C	$3.9 \times 10^{-5}$	$13.0 \times 10^{-5}$	10.40	1.13	104
	D06C	$1.3 \times 10^{-2}$	$3.5 \times 10^{-2}$	11.74		0.48
	S06E	$4.2 \times 10^{-5}$	$14.5 \times 10^{-5}$	6.00	0.980	87
	D06E	$0.36 \times 10^{-2}$	$3.5 \times 10^{-2}$	5.88		0.55
16	S16C	$4.0 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-5}$	9.54	1.12	53
	D16C	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$	10.71		0.17
	S16E	$2.0 \times 10^{-5}$	$8.1 \times 10^{-5}$	4.79	1.18	48
	D16E	$1.2 \times 10^{-2}$	$9.1 \times 10^{-2}$	5.65		0.084
26	S26C	$4.9 \times 10^{-5}$	$8.8 \times 10^{-5}$	8.94	1.14	35
	D26C	$2.0 \times 10^{-2}$	$9.5 \times 10^{-2}$	10.19		0.10
	S26E	$3.1 \times 10^{-5}$	$13.0 \times 10^{-5}$	3.20	1.37	37
	D26E	$1.3 \times 10^{-2}$	$7.3 \times 10^{-2}$	4.38		0.048

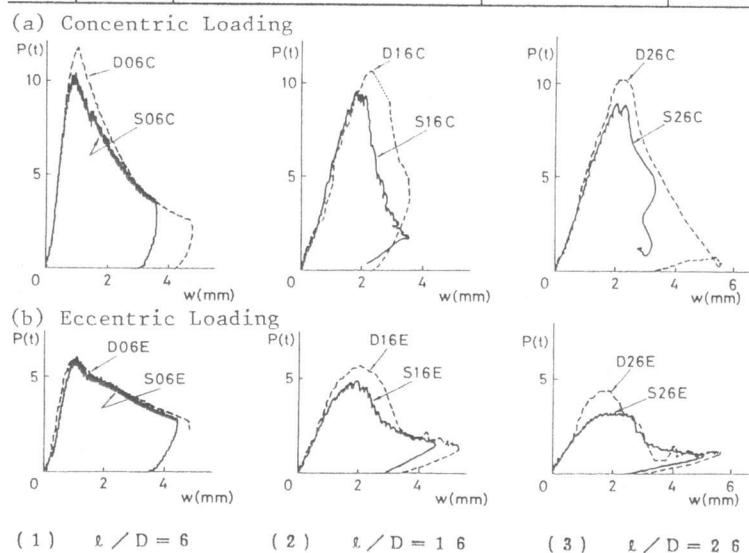


図 4 荷重-軸方向変形関係

で、速度の遅い場合にはストロークが階段関数的に制御されることによる。最大荷重  $P_{max}$  は表4に示すように、動的載荷のものが準静的載荷のものに比べて1~2割程度上昇しており、短柱の偏心載荷の場合の1例だけはほとんど値が変らなかったが、載荷速度の影響が明らかに現れていることがわかる。

3.3 破壊状況 部材の破壊は D16C を除いて概ね部材中央に集中している。載荷開始から最大荷重に至るまでの時間  $T_{P=P_{max}}$  は表4のように準静的載荷の場合 104 秒~ 35 秒、動的載荷の場合 0.55 秒~0.048 秒で、これらの経過時間が長柱になるほど短くなっているのは、座屈を生じていることによる。 $l/D = 26$  の長柱の中心圧縮の場合は、準静的な載荷でも座屈を生じた時に一瞬のうちに横方向変形を伴って破壊しており、部材中央ではコンクリートの破片が飛び散るほどの急激なものであった。部材の破壊状況についてはこの実験では載荷速度の影響は特に現れていないと思われる。

#### 4. 解析による結果との比較および検討

中心圧縮を受ける柱の歪速度の大きさは座屈するまで部材内でほぼ一定であると考えられるが、偏心圧縮荷重を受ける柱では歪速度の大きさは部材内および断面内の位置によって変化する。解析上、部材のすべての要素における歪速度の変化を考慮することは相当に複雑となる。若林ら<sup>2)</sup>は、解析的には材料の降伏応力度を一律に上昇させることによって鋼構造部材や骨組の挙動に及ぼす歪速度の影響を考慮する方法が、時々刻々に断面内で要素分割した各要素の応力-歪関係に歪速度の影響を考慮する方法による解析結果や実験結果と比較的よく合うことを示している。この場合、仮定する応力の上昇率は構造部材の最大応力を受ける部位における最大歪速度の平均レベルに対応した値をとれば、地震力などの動的加力を受ける構造物の挙動における歪速度の影響をうまく評価できるということである。

これらの研究成果に従い、応力-歪関係を図5のように仮定し、作用する歪速度に対応してコンクリートの圧縮強度  $\sigma_c$  および鉄筋の降伏強度  $\sigma_y$  の強度レベルを増大させたものとした。解析では歪速度を準静的載荷時  $\dot{\epsilon}_0 = 5 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 、動的載荷時  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-2}/\text{sec}$  として、材料の動的実験結果<sup>1)</sup>に基づいて準静的な強度  $\sigma_{c0}$ ,  $\sigma_{y0}$  に対する強度の上昇率をそれぞれ次式

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}} = 1 + 6.58 \times 10^{-2} \log_{10} \left| \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right| \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}} = 1 + 4.73 \times 10^{-2} \log_{10} \left| \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right| \quad (2)$$

で与え、 $\sigma_c/\sigma_{c0} = 1.20$ ,  $\sigma_y/\sigma_{y0} = 1.17$  とした。

中心圧縮を受ける鉄筋コンクリート長柱の座屈荷重  $P_{CR}$  を接線係数理論 (tangent modulus theory) と累加強度理論によって求めた。接線係数理論による方法は細長い合成柱について Bondale<sup>3)</sup> が用いたものと同様である。

累加強度理論では、鉄筋コンクリート柱の中心圧縮座屈荷重を4本の鉄筋からなる鋼柱の座屈荷重とコンクリート柱の接線係数荷重の和として求めた。これは若林・吉田<sup>4)</sup>による中心圧縮を受ける細長

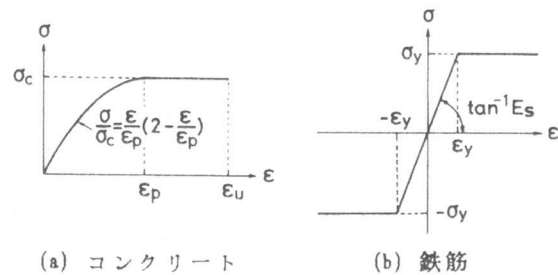
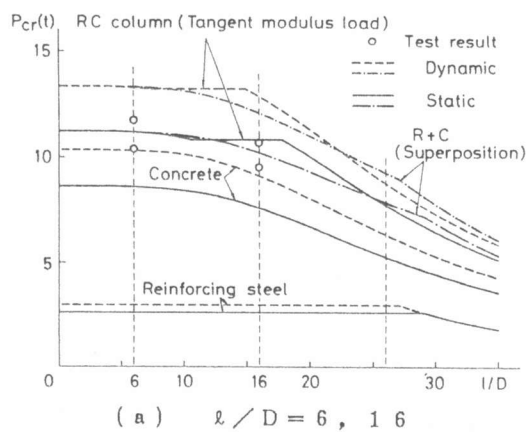
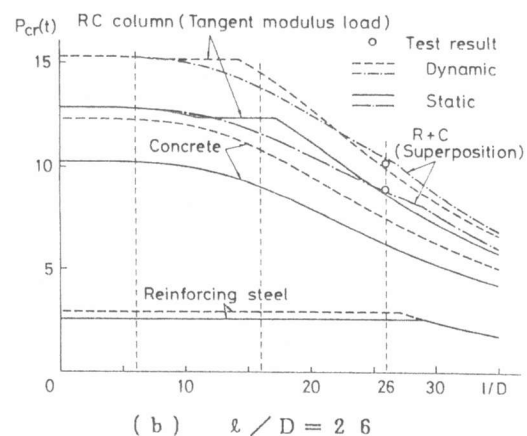


図5 応力-歪関係の仮定



(a)  $l/D = 6, 16$



(b)  $l/D = 26$

図6 座屈曲線

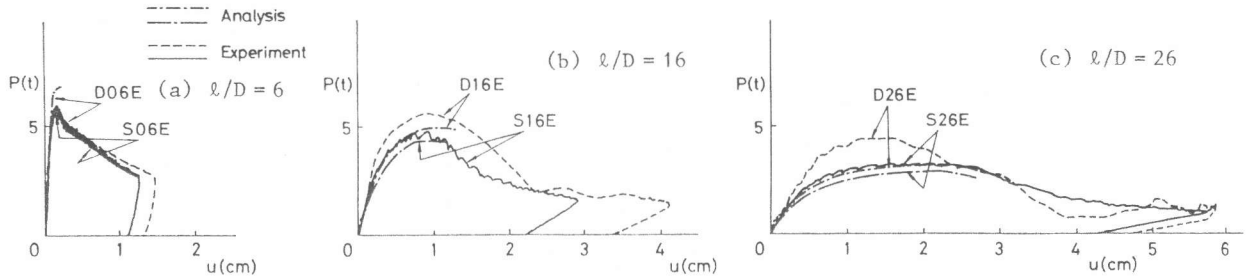


図7 荷重—横方向変形関係

い合成柱の累加強度式の考え方を鉄筋コンクリート柱に適用したものである。鋼柱とコンクリート柱の座屈荷重を、同じ材長  $l$  について累加し、合成した柱の座屈荷重とする。

解析で仮定した準静的載荷時の材料定数は実験に対応したものでコンクリートの  $\sigma_c = 240 \text{ kg/cm}^2$  ( $l/D = 6, 16$ ) ,  $285 \text{ kg/cm}^2$  ( $l/D = 26$ ) ,  $\epsilon_p = 0.0025$  ,  $\epsilon_u = 2 \epsilon_p$  , 鉄筋  $\sigma_y = 4.1 \text{ t/cm}^2$  ,  $E_s = 2100 \text{ t/cm}^2$  である。

累加強度式による座屈曲線を図6に示し、一体断面の接線係数理論によるものと比較した。図中、実線は準静的な載荷下での鋼柱とコンクリート柱および一体断面としたときの接線係数荷重を表し、1点鎖線は鋼柱とコンクリート柱の累加を示す。破線はそれぞれの動的な載荷下における座屈荷重である。これらの差はかなり小さいと言える。○印は中心圧縮載荷の実験結果である。

偏心圧縮を受ける長柱の弾塑性挙動の解析法は、部材を材軸方向に要素分割し、その各点で釣合条件を満足させる方法<sup>5)</sup>で、得られた荷重—変形関係を図7に、最大荷重  $P_{max}$  を表5に示す。最大荷重の大きさには実験結果との差がみられるが準静的載荷に対する動的載荷時の最大耐力の上昇率 ( $P_{d,max}^p / P_{s,max}^p$ ) は 10~18% で実験結果とほぼ同じ程度である。表5には、中心圧縮載荷の試験体についても、 $e = 0.6 \text{ mm}$  ( $e/D = 1/100$ ) の微小な材端偏心を与えて求めた解を示した。その結果は接線係数荷重  $P_{cr}$  より 5~15% 程度低くなるものの、耐力上昇率は接線係数理論によるものとよく似ている。

### 5. 結論

- (1) 実際に作用した速度比 330~600 倍の載荷では、動的載荷時の最大荷重は、中心圧縮の場合に準静的載荷時の 11~14% の上昇を示し、偏心圧縮の場合に 17~37% の上昇を示した。柱部材の座屈荷重に載荷速度の影響が現れている。
- (2) 部材の破壊状況については載荷速度の影響は特に現れていない。
- (3) 材料強度レベルを、部材の最大応力を受ける部位における最大歪速度に対応して増大し、応力—歪関係に歪速度の影響を考慮することによって長柱の挙動に及ぼす載荷速度の影響を解析的に求めた結果は動的な載荷実験による座屈荷重の上昇の程度をよく予測する。

### 参考文献

- 1) 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（その1 コンクリートと鋼材の応力—歪関係に及ぼす歪速度の影響），日本建築学会論文報告集，第314号，1982. 4. , pp. 102-111.
- 2) 若林・藤原・中村・林・斎藤：鋼3層骨組の地震時挙動に関する実験的研究（その1・その2），日本建築学会近畿支部研究報告集，第24号，構造系，1984. 6. , pp. 457-464.
- 3) Bondale, D. S. : Column Theory with Special Reference to Composite Columns, The Consulting Engineer, Vol. 30, Aug. 1966, pp. 43-48.
- 4) 若林・吉田：細長い合成柱の設計式，日本建築学会論文報告集，第278号，1979. 4. , pp. 27-36.
- 5) 若林・中村・岩井：軸力と2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート長柱の弾塑性安定解析，京都大学防災研究所年報，第23号B-1，1980. 4. , pp. 215-227.

表5 解析結果一覧  
\*)  $P_d$  : dynamic loading  
 $P_s$  : static loading

$l/D$	Specimen	$P_{cr}$ (t)	$\frac{P_{d,cr}^*}{P_{s,cr}^*}$	$P_{max}$ (t)	$\frac{P_{d,max}^*}{P_{s,max}^*}$
6	S06C	11.20	1.19	10.37	1.21
	D06C	13.29		12.56	
	S06E	-----	-----	5.79	1.18
	D06E	-----	-----	6.82	
16	S16C	10.83	1.19	9.42	1.17
	D16C	12.89		11.04	
	S16E	-----	-----	4.30	1.15
	D16E	-----	-----	4.94	
26	S26C	8.71	1.14	7.33	1.15
	D26C	9.94		8.44	
	S26E	-----	-----	2.88	1.10
	D26E	-----	-----	3.16	