

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

BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS SUBJECTED TO DYNAMIC LOADING

睦好宏史*・町田篤彦**

By Hiroshi MUTSUYOSHI and Atsuhiko MACHIDA

The dynamic analysis and the earthquake resistant design for R. C. structures commonly have been conducted on the basis of the assumption that characteristics under dynamic loading are equal to those under static loading. It has hardly been clarified, however, whether fundamental properties of R. C. structures under dynamic loading are equal to those under static loading. The objective of this paper is to make clear the differences between the mechanical properties of R. C. members under dynamic loading and static loading. In order to investigate the dynamic behavior of R. C. members and to clarify the effect of strain rate on the properties of R. C. members, dynamic tensile tests on steel bar were carried out, and small scale R. C. specimens were tested under dynamic loading, steady-state dynamic base motion and static cyclic loading.

1. ま え が き

地震による鉄筋コンクリート（以下 RC と略記する）構造物の被害例は、過去において非常に多く報告されており、特に昭和 53 年に起きた宮城県沖地震では数多くの RC 橋脚に被害が生じ、RC 橋脚の耐震性が問題となってきた。従来 RC 部材の耐震性状に関する研究は建築構造物を対象として数多く行われてきた。これらの研究例では、RC 部材の復元力特性は静的外力下と動的外力下で同一であると仮定し、静的実験から得られた復元力特性をそのままモデル化し、さらに減衰等を適宜考慮して計算により地震時の挙動を求めているものが多い。しかし地震力は動的な繰り返し外力であり、地震力を受ける RC 構造物の各部分は、ある大きさの変形速度およびひずみ速度をもつはずである。したがって、RC 構造物の耐震設計あるいは応答解析を行う場合、RC 部材の力学的特性が静的外力下におけるものと等しいか否かということについて明確にしておく必要がある。従来この種の研究はきわめて少なく、上記の点が十分に検証されているとはいえない。

RC の構成素材であるコンクリートや鉄筋の力学的特性が載荷速度によって異なるということは古くから知られている。たとえば、コンクリートの圧縮強度、引張強度等はひずみ速度の対数に比例して増大すること^{1),2)}や、鉄筋の降伏点、引張強さ等がひずみ速度が大きくなるに従い増大することが実験によって示されている²⁾⁻⁴⁾。また、動的外力を受ける RC 部材の力学的性状に関する過去の研究例としては、RC ばり供試体を用いた一方向急速載荷実験によって、静的と動的ではその挙動は著しく異なることを明らかにしたもの^{5),6)}、アクチュエーターを用いた動的正負繰り返し実験によって、載荷速度によって RC 部材の挙動にそれほど大きな違いは生じないことを明らかにしたものなど^{7)-10),13)}がある。この種の動的実験は試験方法が難しく、また、試験機の能力により載荷速度が限定される場合が多い。したがって、実際の構造物に最も厳しいと思われる地震力が作用した場合に起こり得る載荷速度（またはひずみ速度）を想定して行われた実験例はきわめて少ない。さらに振動台を用いた模擬地震波入力実験によれば、振動時の RC 部材の応答特性は、応答加速度に小さな値を与えることを除いては静的実験によって得られた復元力特性を用いることによって精度よく計算することが可能であることを示している¹¹⁾。このように、動的外力下における RC 部材

* 正会員 工博 埼玉大学助手 工学部建設工学科
(〒338 浦和市下大久保 255)

** 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (同上)

の力学的特性は、ある程度は明らかにされているものの、動的外力を受ける RC 部材の力学的特性がどの程度の荷重速度の大きさにより、いかなる変位のときにおいて影響を受けるのかということに関しては十分に明らかにされていない。また荷重速度が RC 部材の構成素材であるコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ特性に及ぼす影響と復元力特性との関係についても明確にされていない。さらに減衰に関しては、従来考えられてきた速度依存型の粘性減衰が実際に生じ得るのかどうか、あるいはその大きさなどについてはほとんど解明されていない。

本研究は動的外力を受ける RC 部材の基本的な力学的特性、すなわち復元力特性と減衰に着目し、これらを明確にするために、以下に述べる実験結果をとりまとめたものである。すなわち、まず鉄筋の動的引張試験を行い、動的-方向単調および繰り返し引張力が作用した場合の応力-ひずみ特性を明確にし、次に単一柱式 RC 橋脚を対象とした模型供試体を用いて、荷重速度を一定とした動的-方向および正負繰り返し荷重実験を行い、荷重速度が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響およびその原因を実験的に明らかにし、さらに同じ供試体を用いて振動実験を行い、上記の結果を確かめた。

2. ひずみ速度が鉄筋の応力-ひずみ特性に及ぼす影響

(1) 実験概要

鉄筋の応力-ひずみ特性がひずみ速度によって異なることは前述したとおりであるが、その程度は鉄筋の種類、材質等によって異なることも明らかにされている。そこで、既往の研究結果を確かめるとともに、後の解析に便利のように、RC 部材の動的荷重実験で用いる鉄筋と同じものを用いて引張試験を行った。試験に用いた供試体は図-1 に示すように、鉄筋の両端に厚さ 11 mm の鉄板を溶接したものである。荷重装置には 50 t 動的汎用荷重装置を用い、ひずみの計測には鉄筋に貼付したゲージ長 2 mm のワイヤストレインゲージと鉄筋の両端間に設置した変位計を併用した。荷重方法は、動的-方向単調荷重と動的-方向繰り返し荷重の 2 通りで、ひずみ速度がそれぞれ 0.05, 0.5, 5.0, 50.0 %/s となるように鉄筋の両端間の変位を制御して実験を行った。なお、繰り返し引張試験では、ひずみが 2.0, 4.0, 10.0 % に達したときに、荷重を 0 に戻すことによってそれぞれ一方方向に、このひずみと荷重が 0 との間で繰り返し荷重した。測定したデータはすべてデータレコーダに記録し、その後 A/D 変換あるいはオシログラフを用いて再生し、応力-ひずみ曲線を求めた。以下に述べるひずみはすべて鉄筋の両端間の引張変形量をひずみに換算したものを

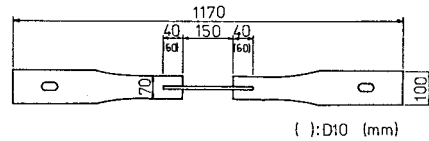


図-1 供試体の形状寸法

表-1 実験結果

	Specimen No.	Strain Rate (1) (%/s)	Strain Rate (2) (%/s)	Elastic Modulus (GPa)	Stress (MPa)		
					Upper Yield	Lower Yield	Ultimate
D6	Monotonic	1	0.05	0.03	225	480	570
		2	0.5	0.18	216	485	584
		3	4.6	1.66	206	492	574
		4	34.0	12.8	206	577	495
		5	40.0	16.0	216	587	498
		6	51.9	18.6	225	609	501
	Reversed	7	0.05	0.02	186	448	549
		8	0.5	0.30	206	461	568
		9	5.0	2.30	206	480	570
		10	5.3	2.32	196	470	463
		11	47.6	17.4	196	545	483
		12	53.0	18.8	196	561	512
D10	Monotonic	13	0.05	0.04	186	349	527
		14	0.5	0.18	176	364	549
		15	4.7	1.64	186	411	388
		16	28.4	9.05	186	462	412
		17	32.0	—	—	433	394
		18	51.9	20.7	167	488	401
		19	0.05	0.02	167	352	351
	Reversed	20	0.55	0.29	167	359	350
		21	0.49	0.22	176	351	342
		22	4.8	1.53	186	390	370
		23	5.0	1.91	186	376	373
		24	49.0	17.1	186	453	399
		25	47.5	17.2	186	438	391
		26	48.0	17.3	176	417	379

Note
 1): Measured by displacement transducer
 2): Measured by strain gauge

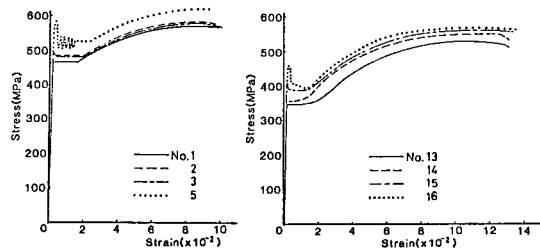
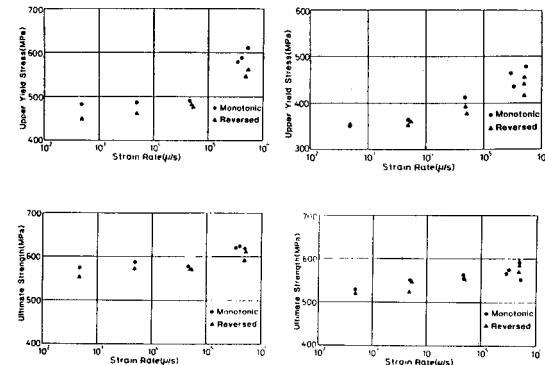


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線 (動的-方向荷重)



(a) D6 (b) D10

図-3 ひずみ速度と上降伏点および引張強度の関係

用い、応力の算定には公称断面積を用いた。表—1に実験要因および実験結果を示す。

(2) 実験結果

動的一方向単調載荷実験より得られた応力-ひずみ曲線の一例を図—2に示す。また、ひずみ速度が上降伏点および引張強さに及ぼす影響を定量的に示したのが図—3である。これより明らかなように、ひずみ速度が増大すると、降伏点以降の曲線が上昇するが、特に上降伏点の上昇が最も顕著であり、降伏棚域、ひずみ硬化域および引張強さ等は上昇はするものの、その程度は上降伏点ほど著しくないことがわかる。また弾性係数はひずみ速度によってほとんど変化しないこともわかる。以上で示したひずみ速度による応力-ひずみ曲線の変化は既往の研究成果と同様の傾向であり、降伏点ならびに引張強さなどの上昇の程度も既往の成果とほぼ同程度である。

上記のような変化が繰り返し載荷を受ける場合にも生ずるかを明らかにするため、下限応力を0とした動的一方向繰り返し載荷試験を行った。試験方法は鉄筋両端間の変位が所定の値に達したときに荷重を低減させることを10回ずつ繰り返したこと以外は、単調載荷試験と同様である。繰り返し載荷試験によって得られた応力-ひずみ曲線の一例を図—4 (a) に示す。繰り返し載荷を受ける場合、繰り返しの第1回目に描かれる応力-ひずみ曲線の包絡線は単調載荷の応力-ひずみ曲線とほぼ一致する。すなわち、繰り返し載荷を受ける場合でも、降伏点、引張強さ等は、ひずみ速度が増大すれば単調載荷の場合と同程度に上昇するのである。しかし、ひずみが所定の値に達して応力が減少を始める点（以下反曲点という）では、このような上昇は認められず、応力は静的載荷の場合とほぼ一致する（図—4 (b)）。これは反曲点においてはひずみ速度が0となるためであると考えられる。また、繰り返し載荷の2回目以降においては、繰り返し回数の増大とともに同一ひずみにおける応力が減少することが認められた。応力の低下は、2回目以降が最も著しく、以後はきわめて小さく、2回目以降の応力は1回目の約8割程度となる。この現象は繰り返し載荷の場合、ひずみ速度にかかわらず、すべての場合に認めら

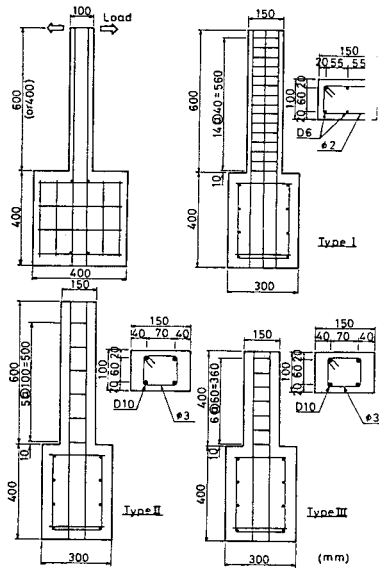
れた。

3. 動的外力を受ける RC 部材の復元力特性

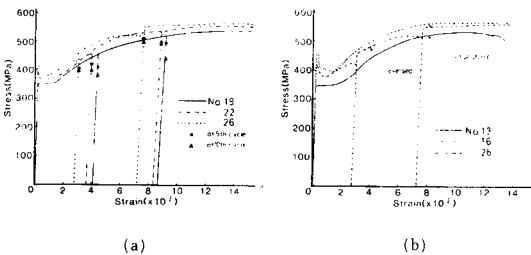
(1) 実験概要

動的載荷実験に用いた供試体は図—5に示すように、断面が10×15 cm、高さが60 cm ($a/d=7$) または40 cm ($a/d=4.5$) の2種類で、主鉄筋量および帯鉄筋量は通常用いられている単一柱式 RC 橋脚とほぼ同じとした。表—2に供試体の種類、実験要因等を示す。コンクリートは、粗骨材の最大寸法を12.5 mmとし、スランプが12 cm、目標強度が27.4 MPaとなるように配合設計した。コンクリートの打設方法は通常の橋脚の場合と同じように、先にフーチングを打ち込み、その後橋柱部を打設した。

載荷方法は動的一方向単調載荷と動的正負繰り返し載荷の2種類で、供試体頭部の変位速度が常に0.1, 10, 100 cm/s (または0.05, 50 cm/s) となるように載荷装置を制御した。変位速度を一定としたのは、一般に構造物の固有周期が長周期になるに従って速度応答スペクト



図—5 供試体の形状寸法



図—4 鉄筋の応力-ひずみ曲線（動的繰り返し載荷）

表—2 供試体の種類および実験要因

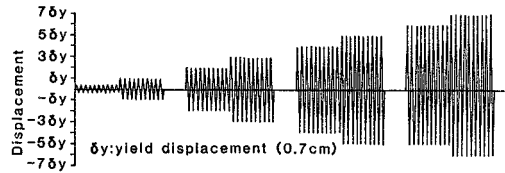
Specimen	Type	Tensile Reinf. Ratio (%)	Shear Reinf. Ratio (%)	Nominal Loading Rate (cm/s)	Loading Method	Compressive Strength of Concrete (MPa)
DA-1	I	0.8	0.1	0.1	Monotonic	26.0
DA-2				100.0		
DB-1				0.1	Reversed	35.3
DB-2				10.0		
DB-3				100.0		
DC-1				II	1.18	0.09
DC-2	100.0					
DD-1	0.1	Reversed	37.8			
DD-2	10.0					
DD-3	100.0					
DE-1	III	1.50	0.05			
DE-2				50.0	21.9	

ルが一定となる傾向があるためであり、載荷速度を上記のように設定した理由は以下に示すとおりである。0.1 cm/s は通常行われている静的実験の載荷速度を想定したものであり、100 cm/s はこの種の実際の RC 橋脚が最も厳しいと思われる地震を受けたときに起こり得る最大応答速度と鉄筋の降伏時におけるひずみ速度を考慮したものである。たとえば、建設省の標準設計に多用されている単一柱式 RC 橋脚の中で、比較的短周期な橋脚（たとえば高さ 7 m 程度、固有周期約 0.5 秒、降伏変位約 2 cm 程度とする）を対象として考えると、最も厳しいと思われる地震（地動加速度を 0.35 g と仮定する）を受けたとき、 $h=0.05$ と仮定した場合の最大応答速度は約 100 cm/s 程度となる（梅村のスペクトルより¹⁹⁾。これを用いて単純に計算を行えば、降伏変位に至る時間は約 0.02 秒となる。本実験で用いた供試体および載荷速度では（降伏変位約 0.7 cm、実験から得られた平均変位速度約 80 cm/s）、降伏変位に至る時間は、およそ 0.01 秒となり、上記の設定値は載荷速度による影響を調べるうえで十分な値であると考えられる。

動的一方向載荷実験では、上記の変位速度が得られるように制御して、1 回の載荷で破壊に至らした。動的正負繰り返し実験では、入力波形として正弦波を用い、上記の変位速度となるように変位振幅および振動数を設定して（表—3）、図—6 に示すように降伏変位の整数倍の変位をおのおの 10 回ずつ繰り返した。載荷装置として 1 t または 5 t 動的汎用載荷装置を用いた。動的載荷実験を行う場合、一方向載荷、正負繰り返し載荷のいずれの場合も供試体頭部の載荷治具、加振機先端の取り付け治具および供試体重量等による慣性力が載荷方向に生じる。この慣性力については後に述べるような補正を行った。また、このような水平方向の慣性力に加えて供試体がたわむことにより加振機が上下方向に運動し、上下方向にも慣性力が働きこれが偏心荷重として供試体に作用する。このような上下方向の慣性力に対しては加振機を固定するとともに、回転と上下方向の移動が可能な治具によって供試体と緊結して、これが生じないようにした。図—7 に載荷状況を示す。

（2）計測システムおよびデータ処理

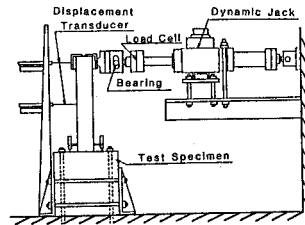
計測システムおよびデータ処理過程を図—8 に示す。実験から得られたデータはすべてデータレコーダに記録し、その後 A/D 変換を行った。A/D 変換を行う場合、正負繰り返し載荷では変位振幅の大きさによって周期が異なるので、1 周期の波、すなわち 1 つの履歴ループに対してサンプリング個数が約 60 個となるようにサンプリングタイムを設定した。動的正負繰り返し実験では、供試体に働く復元力は式（1）に示すように、ロードセルから測定された荷重と供試体に作用する慣性力を合わ



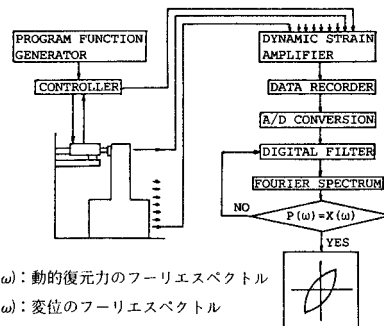
図—6 載荷計画（供試体 DB）

表—3 入力振動数 (Hz) の一例（供試体 DB）

Displacement Nominal Loading Rate (cm/s)	—	δy	2δy	3δy	4δy	5δy	6δy	7δy
0.1	0.08	0.023	0.011	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003
10.0	8.0	2.3	1.1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3
100.0	30.0	22.7	11.4	7.6	5.7	4.5	3.8	3.2



図—7 載荷状況



$P(\omega)$: 動的復元力のフーリエスペクトル
 $X(\omega)$: 変位のフーリエスペクトル

図—8 計測システムおよびデータ処理過程

せた抵抗力を動的復元力とした。供試体に働く慣性力を求めるには、まず実験から得られた供試体頭部の変位を 2 回微分することによって加速度を求め、次に供試体頭部の載荷治具の質量、ロードセルの外側にある加振機先端の載荷装置の質量および供試体の柱脚部の質量の 33/140¹⁹⁾を加え合わせたものと加速度との積を求めて供試体に作用する慣性力とした。

$$P_i = P_{0i} - (W_1 + W_2 + W_3) \times \ddot{X}_i \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_i : 時刻 i における復元力

P_{0i} : \times ロードセルから測定された荷重

W_1 : 供試体頭部の載荷治具の質量

W_2 : ロードセルの外側にある載荷装置の質量

W_3 : 供試体柱脚部の質量 \times 33/140

\ddot{X}_i : 時刻 i における加速度

載荷速度が 0.1 および 10 cm/s では、実験から得られた変位、あるいは荷重などのデータには波形の乱れはほとんどみられなかったが、100 cm/s では変位が 2 cm より小さいときに、載荷治具および計測器などのノイズによる高周波成分がデータの中に含まれており、波形の乱れが観察された。このため真のデータを得るために、A/D 変換されたデータに対して Hanning のデジタルフィルターを用いて高周波成分を取り除いた¹⁵⁾。これの適用にあたっては、式 (1) によって計算される復元力のフーリエスペクトルが変位のフーリエスペクトルとほぼ同等となるように、その回数を定めた。通常の場合、ロードセルから得られた荷重、変位から求めた速度、慣性力の影響を考慮した復元力に対して、それぞれ 2 回ずつフィルターをかけることによって満足すべき結果が得られた。

(3) 動的一方向外力を受ける RC 部材の復元力特性

図-9 は動的一方向載荷実験から得られた荷重-変位曲線を示したものである。図に示すように、動的載荷された場合は静的載荷に比べて、初期剛性、降伏荷重、最大荷重等がいずれも著しく増大している。まず、初期剛性が増大した理由について考えてみることにする。ひずみ速度が鉄筋の弾性係数に及ぼす影響は、2. で述べたように概して小さいが、コンクリートの弾性係数はひずみ速度により増大することがすでに確かめられている²⁾。すなわち、載荷速度により RC 部材の初期剛性が増大した理由は、ひずみ速度によるコンクリートの弾性係数の上昇が寄与していると考えられる。次に荷重が増大した原因を明確にするために、ストレインゲージによって測定した橋柱部とフーチング界面にある鉄筋のひずみ速度をもとに、これに相当する上降伏点を鉄筋の動

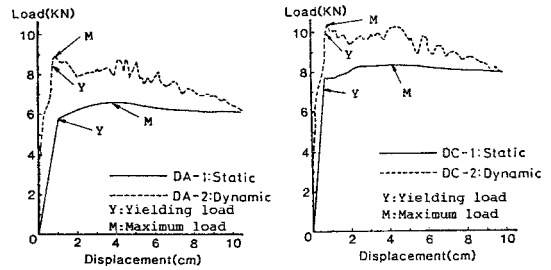


図-9 荷重-変位曲線 (一方向載荷)

表-4 実験結果および計算結果

Specimen No.	Yielding Load (KN) ¹⁾		Maximum Load (KN)		Measured Displacement Rate (cm/s)	Strain Rate (%/s) ²⁾
	Measured	Calculated	Measured	Calculated		
DA-1	5.79	5.50	6.62	6.13	0.1	0.02
DA-2	8.33	7.61	8.85	7.86	76.0	28.0
DC-1	7.15	7.29	8.33	7.66	0.1	0.04
DC-2	9.97	9.82	10.23	10.12	77.0	25.0

1) Load at yielding of longitudinal bar.
2) Measured by strain gauge at yielding of longitudinal bar.

的一方向引張試験から求めて、RC 部材の降伏荷重および最大荷重を計算した。この結果は表-4 のようである。計算にあたっては、載荷速度が大きくなるに従いコンクリートの強度も増大することが考えられるが、本実験で用いたような曲げ降伏型の供試体ではコンクリートの応力-ひずみ特性が変化しても、その耐力にはほとんど影響を及ぼさないので鉄筋の力学的特性の相違のみを考慮した。表に示すように、計算値は実験値と比較的によく一致している。このことは、動的載荷した場合の降伏荷重、最大荷重等の増大は、鉄筋の降伏点の上昇が主な原因であることを示している。すなわち、RC 部材が一方向載荷された場合、載荷速度が大きいと、引張鉄筋には載荷速度に応じたひずみ速度が生じ、これによって鉄筋の降伏点が増大して、曲げ耐力が増大するのである。

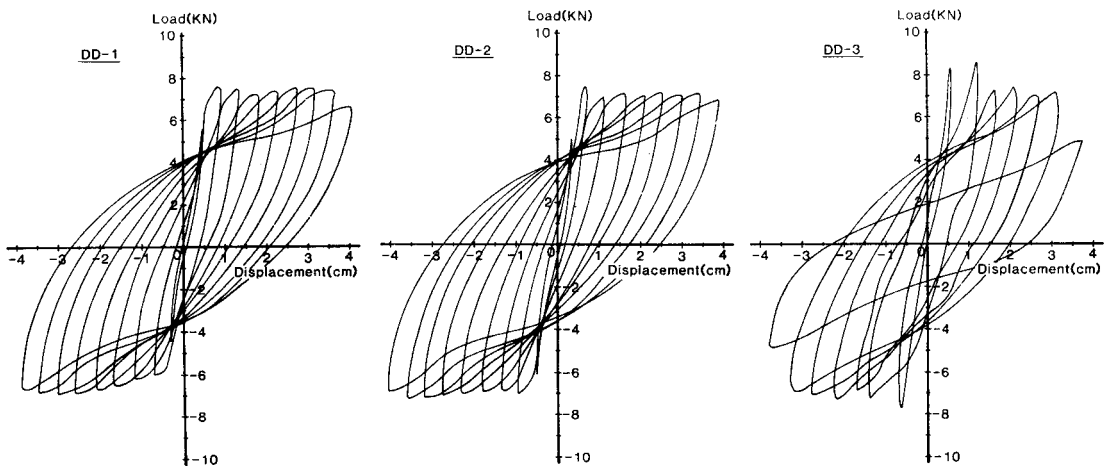


図-10 荷重-変位曲線 (動的繰返し載荷)

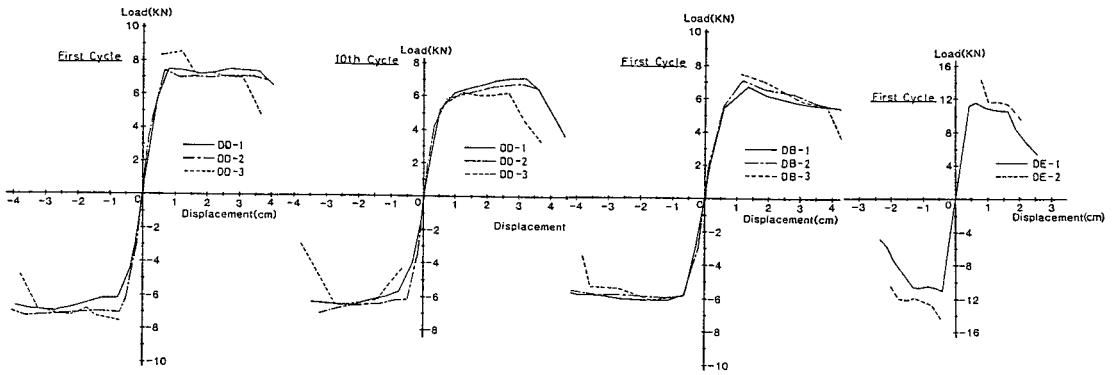


図-11 スケルトンカーブ (動的繰り返し載荷)

(4) 動的正負繰り返し外力下における復元力特性

上で述べた動的一方向載荷を受けるRC部材の性状および動的繰り返し載荷を受ける鉄筋の応力-ひずみ特性を考慮すると、RC部材が動的繰り返し載荷を受ける場合には静的繰り返し載荷を受ける場合とは異なる挙動をする可能性があると考えられる。これを確かめるために、RC部材の動的正負繰り返し載荷実験を行った。図-10はDD-1, 2, 3についてある変位において第1回目に描く履歴曲線を示したものであり、また図-11は各供試体が描く履歴曲線の包絡線を示したものである。これによれば、DD-3, DE-2において第1回目に描く履歴曲線の頂点における荷重はDD-1およびDE-1のものに比べて $\delta_y \sim 2 \delta_y$ (δ_y : 鉄筋が降伏ひずみに達したときの変位, $\delta_y = 0.5 \text{ cm}$ (DD-1), 0.55 cm (DD-2), 0.6 cm (DD-3), 0.45 cm (DE-1, 2)) において、荷重は20%程度大きな値を示している。一般に、動的繰り返し載荷を受ける場合には、一方向単調載荷の場合とは異なり、変位の折り返し点(反曲点)では変位速度は0となる。したがって、変位最大点においては鉄筋のひずみ速度も0に近くなり、荷重は大きく増大しないことが予想される。このような予想に反して上記の結果が得られた理由を明らかにするため、DD-2, DD-3, DE-2の柱基部における鉄筋のひずみ、復元力および変位の時刻歴を電磁オシログラフによって再生されたものを図-12に示す。これによると、復元力の増大がみられた δ_y 付近における履歴曲線の頂点、すなわち反曲点では鉄筋のひずみは弾性域から降伏ひずみを越えるが、降伏ひずみを越える瞬間にはある大きさのひずみ速度が生じていることが認められる。たとえば、DD-3においては主鉄筋が降伏ひずみに達するときのひずみ速度は、正方向で11%/s、負方向で16%/s程度生じており、また、DE-2においても正負両方向において、23%/s程度生じていることが実験から確かめられた。すなわち、 $\delta_y \sim 2 \delta_y$ では履歴曲線の反曲点においてもひずみ速度が生じ

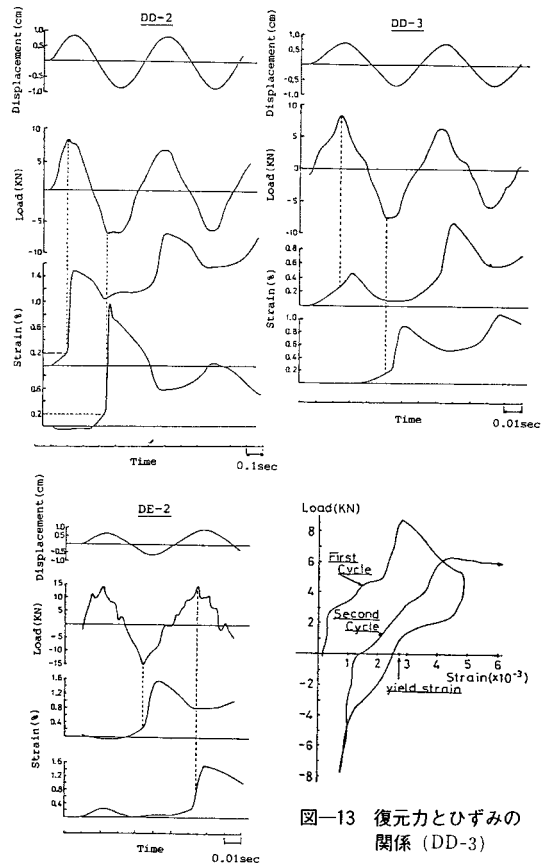


図-12 変位、復元力ひずみの時刻歴

図-13 復元力とひずみの関係 (DD-3)

るのであって、これにより降伏点が上昇し、RC部材の耐力が増大したのである。しかし、2回目で降繰り返された場合の履歴ループについてみると、上記のような降伏点の上昇は生じないことが認められた。これは、動的繰り返し載荷を受ける鉄筋の応力-ひずみ特性で示されたように、2回目以降に描く鉄筋の応力-ひずみ経路は

1 回目を経験した履歴経路を通らず (図-13 参照), ひずみ速度による上降伏点の上昇は, 2 回目以降の応力-ひずみ経路においては経験しないこと. さらに, 同一ひずみにおいて繰り返された場合には, 繰り返しにより応力が低減していくこと等によるためである. したがって, 降伏変位付近においても, 2 回目以降に描く RC 部材の履歴ループは静的と動的では載荷速度によらずほとんど等しくなる. なお, DB-3 の履歴曲線においては, 上で述べたような荷重の顕著な上昇は認められなかった. これは, 動的実験時において, 変位が降伏変位よりも小さい段階において, 繰り返しにより鉄筋が降伏し, 次の変位段階に移るときには降伏変位よりもかなり大きな変位に移行したために, 降伏変位付近における履歴曲線が得られなかったためである. また, 図-10 によれば, 変位速度が 10 cm/s (DD-2) における履歴曲線のループ形状および最大荷重は 0.1 cm/s (DD-1) のものと比べて大きな相違は認められない. これは柱基部の鉄筋のひずみ速度は降伏ひずみを越えるとき, 約 2% 程度と小さく, これが RC 部材の耐力に及ぼす影響はそれほど大きくないからであると考えられる.

次に変形が大きくなった場合 ($3\delta_y \sim 4\delta_y$ 以降) について比較してみると, 静的と動的では繰り返し回数によらず履歴ループ, 耐力ともにほとんど同じであるといえる. この領域では, 鉄筋のひずみはひずみ硬化域を越えており, ひずみ速度による応力の上昇は降伏点の場合に比べて小さいことなどにより, 部材の耐力にはそれほど大きな影響を及ぼさないものと考えられる. さらに変形が大きい領域 ($4\delta_y$ 以降) では, DB-3, DD-3 ともに耐力が急激に減少する傾向が認められた. このことに関しては 6. で詳しく述べることにする.

以上のように, 動的正負繰り返し荷重を受ける RC 部材の復元力特性に及ぼす載荷速度の影響は降伏変位付近において第 1 回目に描く履歴曲線に対して最も大きく, 2 回以降繰り返した場合, あるいは大変形域においては載荷速度による耐力の上昇はほとんどなく, 履歴曲線の形状は静的の場合とほとんど同じであるといえる. しかし, 終局時においては, 載荷速度により耐力が急激に減少し, 靱性に欠ける傾向がみられた.

4. 正弦波振動下における RC 部材の挙動

鉄筋および RC 部材の動的載荷実験から, 載荷速度が RC 部材の荷重-変位特性に及ぼす影響およびその原因はほぼ明らかとなった. しかし, 動的載荷実験では供試体頭部を強制的に加振したのであり, 実際の地震時には地盤面が振動し, 構造物の応答速度は主に構造物の固有周期と地震動の大きさによって決定される. したがって, 地盤面が振動する場合の RC 部材の力学的特性に

表-5 供試体の種類および実験要因

Specimen	Tensile Reinf. Ratio (%)	Spacing of Stirrups (cm)	Shear Reinf. Ratio (%)	Number of Cycles	Loading Method	Failure Mode
SA-1	2D6	φ2-8	0.05	64	S,D	Flexure
SA-2		φ2-4	0.1	105		
SB-1	3D6	φ2-8	0.05	169	S,D	
SB-2		φ2-4	0.1	237		
SB-3		φ2-3	0.14	565		
SC-1	2D10	φ3-20	0.05	481	S,D	
SC-2		φ3-10	0.09	1002		
SC-3		φ3-8	0.12	1205	D	Flexure

S:static test D:shaking table test

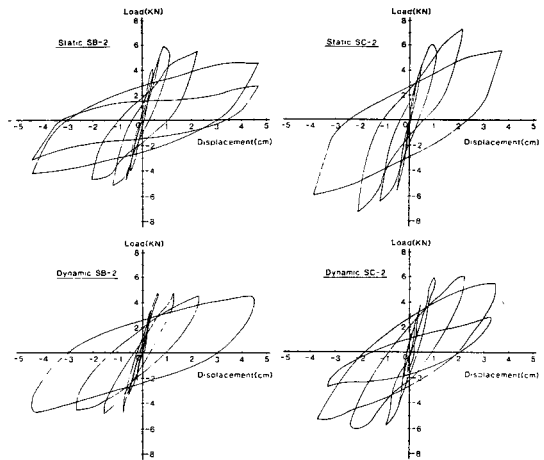


図-14 履歴曲線の一例

についても同様に検討しておくことが必要であると考え, 以下の振動実験および静的正負繰り返し載荷実験を行うて検討した.

実験に用いた供試体は, 動的載荷実験に用いた供試体と同じ形状寸法のものである. 表-5 に供試体の種類, 実験要因等を示す. 振動実験および静的載荷実験ともに供試体頭部に 833 kg の重りを緊結した. これによる軸応力は 539 kPa である. 重りを緊結するにあたっては, 重りの中心に働く回転慣性力を除去するために, 重りがその中心で自由に回転できるような用具を用いた.

振動実験では入力波として正弦波を用い, 入力振動数の設定には, 計算によって求めた荷重-変位曲線から等価剛性を用いて算出した供試体の固有振動数と変位との関係をあらかじめ求めておき, これをもとに供試体の固有振動数と振動台の振動数とがほぼ一致するように, 供試体頭部の変位の増大に従って振動台の振動数を逐一変化させて加振した. すなわち, 供試体は常に共振に近い状態で振動していることになる. 実験は一つの供試体について破壊に至るまで連続して行った. 静的実験では, 3. で述べた実験と同様, 供試体頭部に水平力を正負繰り返しして載荷した. この場合の頭部の変位振幅およびその繰り返し回数は, 振動実験から得られたものと全く等しく

した。これは、復元力特性に及ぼす繰り返し回数の影響を排除して比較するためである。

振動実験から得られる供試体の復元力は式(2)に示すように、減衰力をも含めた全抵抗力、すなわち重り重心の加速度と重りの質量をかけあわせたものを供試体に働く復元力とした。

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x}; t) = -m\ddot{y} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 m ：重りの質量、 $f(x, \dot{x}; t)$ ：供試体に働く動的復元力、 \ddot{x} ：相対加速度、 \ddot{y} ：地盤の加速度
この取扱いは、3. に述べた動的繰り返し載荷実験における復元力と同等に扱ったことになる。

図—14は、静的および振動実験によって得られた履歴曲線の一例を示したものである。図に示した荷重-変位曲線はある変位において最初に描く履歴曲線を示したもので、同一変位における繰り返しによる影響は含まれていない。図に示すように、ループ形状は変位が $\delta_y \sim 3\delta_y$ において振動実験から得られたものは紡錘形を描くのに対し静的実験によるものは、わずかではあるが逆S字形を描き、ループ形状に多少の違いがみられた。ループ形状が逆S字形となることは、前章の変位速度を0.1 cm/sとした実験では認められていない。前章の実験と本章の実験の相違は軸力の有無であるから、本章で逆S字形となったのは、軸力の影響と考えられる。しかし、振動実験では軸力が作用してもループ形状は逆S字形とはなっていない。したがって、軸力の影響に関しては、さらに検討する必要がある。このように、静的外力および振動外力下における復元力特性には違いはみられるものの、ループ形状におけるこの程度の相違は、復元力をモデル化する場合に生じる誤差に比べてかなり小さく、部材の応答にもあまり影響を及ぼさないと考えられる。また $3\delta_y$ 以降では両者のループ形状はほとんど同一であった(図—14参照)。動的載荷実験では降伏変位付近において荷重が上昇する現象がみられたが、振動実験ではそのような傾向は認められなかった。この理由は、振動実験では供試体頭部の応答速度は変位の大きさにより異なるが、最大応答速度は降伏変位付近において約20 cm/sと動的載荷実験の変位速度約100 cm/sに比べてかなり小さいことによると思われる。動的載荷実験においても、変位速度が10 cm/sの場合には、荷重の上昇はみられなかったのである。したがって、振動実験においても、応答速度が大きい場合には、耐力の上昇は十分に得ると考えられる。すなわち、振動外力下におけるRC部材の挙動は、基本的には、頭部に動的正負繰り返し外力を受ける場合の挙動と同一と考えてよく、動的正負繰り返し実験から評価することが可能である。

以上3. および4. の実験結果から、動的外力および振動外力を受けるRC部材の復元力特性は、応答速度

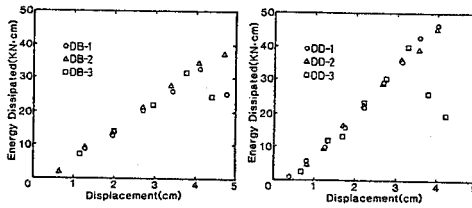
が速い場合には、鉄筋に生じたひずみ速度により $\delta_y \sim 2\delta_y$ 付近において、荷重が上昇すること、降伏変位を越えた大変形領域ではこのような現象はほとんど認められないこと、履歴ループの形状は変位の大きさにかかわらず、静的実験によるものとほとんど等しいことなどが結論される。しかし、静的および動的復元力特性はともに、繰り返しにより耐力は低減し、履歴ループがやせていく傾向を示しているため、これらに関してはさらに検討する必要がある。

5. 動的外力を受けるRC部材の減衰特性

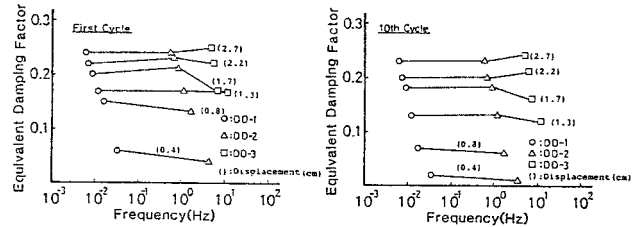
構造物の耐震性を支配する重要な要因として、復元力特性のほかに減衰特性が考えられる。構造物の減衰を考える場合には、構造物本体の減衰、あるいは地盤との相互作用による減衰等が考えられる。ここでは、RC部材本体の減衰にのみ着目することにする。

地震動を受ける構造物本体の減衰機構は、一般にVoigtによって提唱された速度の大きさに依存する粘性減衰や、あるいは構造物が履歴ループを描くことによって生じる履歴減衰等が考えられてきた。しかし、RC構造物の減衰特性を評価する場合、前者のVoigtモデルでは実際の現象を十分に説明することができないとする報告もあり^{17),18)}、RC構造物に速度依存型の粘性減衰が実際に生じ得るのかどうか、あるいはその大きさ等については実験的に検証した例はきわめて少なく、いまだ不明な点が多く残されている。そこで、すでに述べた動的正負繰り返し載荷実験および振動実験の結果をもとに、RC部材の減衰特性に検討を加えた。

図—15は動的正負繰り返し実験から得られた各変位の第1サイクル目の履歴ループが囲む面積、すなわちエネルギー吸収量と変位との関係を示したものである。図のようにエネルギー吸収量は変位が大きくなるとともに直線的に増加する。しかし、増加する割合あるいは同一変位におけるエネルギー吸収量の大きさは載荷速度によらずほとんど同じである。もし速度に依存する粘性減衰があるとするならば、エネルギー吸収量は載荷速度が増せば増加するはずであるから、図—15の結果は、粘性減衰がないことを示している。図—16は動的実験から得られた同一変位における第1サイクル目のエネルギー吸収率、すなわち等価減衰定数(h_{eq})と入力振動数との関係を示したものである。速度依存型の粘性減衰がRC部材に生じるならば入力振動数の大きさによって等価減衰定数の値は異なることになる。しかし図に示すように、同一変位における値は振動数にはよらずほとんど等しい値を示している。すなわち、図—16の結果も図—15と同様、速度依存型の粘性減衰はほとんど生じていないことを示唆している。



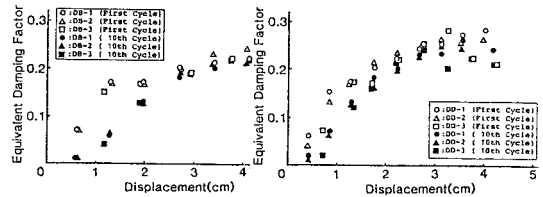
図一15 エネルギー吸収量と変位の関係



図一16 等価減衰定数と振動数の関係

図一17はおのおのの荷重速度における第1および10サイクル目の等価減衰定数と変位との関係についてまとめたものである。変位が $3\delta_y$ より小さいとき、 h_{eq} は繰返しにより著しく低減する傾向が認められる。すなわち、履歴減衰は、変位の大きさのみならず、荷重の繰返し回数によっても影響を受けるのである。このことは、たとえば、等価線形化法による応答解析を行う場合に、等価減衰定数を定めるにあたって注意すべき事項である。しかし、 h_{eq} は荷重速度にはほとんど依存せず、変位の増大に伴って大きくなる傾向を示している。

以上のように、RC部材にはVoigtモデルで示されるような速度依存型の粘性減衰はほとんど生じず、変位の大きさに依存した履歴減衰が支配的であるといえる。このことはまた、地震のような動的繰返し外力を受けるRC構造物本体の減衰特性、すなわちエネルギー吸収および減衰定数等は静的外力下におけるものと同等に評価してもよいことを示唆している。

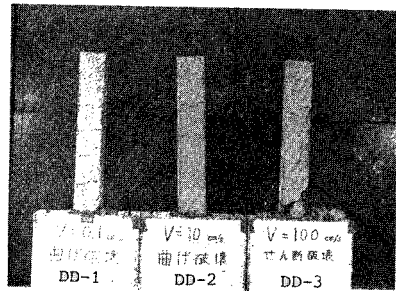


図一17 等価減衰定数と変位の関係

6. 終局状態に対する検討

動的正負繰返し荷重実験において、DDタイプの供試体は、写真一1に示すように、荷重速度が0.1および10 cm/sのものとともに鉄筋が降伏し、圧縮域のコンクリートが破壊して、最終的には高応力の繰返しにより鉄筋が破断したが、100 cm/sでは鉄筋が降伏した後せん断破壊が生じ、荷重速度により終局破壊形式に違いが生じた。このため、図一11に示したように、最大耐力以降の荷重-変位曲線においても違いがみられ、荷重速度が100 cm/sのものは耐力が急激に減少し、靱性に欠ける傾向がみられた。またDBタイプは荷重速度にかかわらず曲げ破壊を示したが、荷重速度が速い場合には、DDタイプと同様、靱性に欠ける傾向がみられた(図一11)。

このように動的繰返し荷重を受けるRC部材の挙動は、降伏変位付近において荷重の上昇がみられるものの(DD-3, DE-2)、最大耐力を過ぎてからは、荷重は急激に減少し、靱性に欠ける傾向がみられた(DB-3, DD-3)。さらに、終局破壊形式にも違いが生じる現象(DD-3)がみられた。これらのことは荷重速度が上昇すると部材の変形性能が低下することを示しており、実



写真一1 終局破壊状況

際の構造物の耐震性を評価するうえできわめて重要な問題である。このことに関しては現在研究を続行中である。

7. 結 論

地震力を対象とした動的荷重を受けるRC部材の基本的な力学的特性を解明するために、鉄筋の動的一方向単調および繰返し引張試験、アクチュエーターを用いたRC部材の動的一方向および正負繰返し実験、さらに振動台を用いた振動実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 動的一方向荷重を受けるRC部材の降伏耐力、最大耐力はともに静的荷重の場合に比べて著しく増大するが、これは主にひずみ速度により鉄筋の降伏点等が上昇したためであり、これを考慮することによって動的一方向荷重下におけるRC部材の耐力を求めることが可能である。

(2) 動的正負繰返し荷重を受けるRC部材の荷重-変位特性に及ぼす荷重速度の影響は、変位が δ_y から $2\delta_y$ において、第1回目に荷重された場合が最も大きく、2回以降繰返した場合、あるいは $2\delta_y$ を越えた

大変形領域では載荷速度による影響は概して小さいことが認められた。これらのことは、鉄筋に生じるひずみ速度と応力-ひずみ曲線との関係から明解に説明することができる。なお、履歴ループの形状は載荷速度にかかわらずほとんど同じループ形状を示すことが明らかとなった。さらに、振動実験の結果より、振動応答時のRC部材の復元力特性は、動的正負繰り返し実験により評価することが可能である。

(3) 動的外力下におけるRC部材の減衰特性は、載荷速度により影響を受けないことが明らかとなった。このことは、RC部材の減衰機構は速度依存型の粘性減衰によるものではなく、変位の大きさに依存した履歴減衰が支配的であることを示している。また、静的正負繰り返し実験から、RC部材の減衰特性を評価することができるといえる。

(4) 動的正負繰り返し荷重を受けるRC部材の荷重-変位特性は最大耐力を越えてから荷重が急激に低減する傾向がみられた。また、載荷速度により終局破壊形式に違いが生じる可能性があることが示された。

8. あとがき

本研究を行うにあたって、埼玉大学教授 田島二郎先生、東京大学教授 岡村 甫先生、東北大学助教授 柴田明徳先生から貴重なご助言を頂いた。また、振動実験を行うにあたって、土木研究所の岩崎敏男部長、萩原良二研究員から多大なご援助を頂いた。さらに元埼玉大学生の西山正志、池田利之、佐原 正、野中信考四氏のご協力を頂いた。なお、本研究の一部は埼玉大学と建設省土木研究所との共同研究として行われたものである。

本研究は文部省科学研究費(課題番号57850151, 同57750399)によって行われた研究成果および昭和57年度吉田研究奨励金による研究成果を取りまとめたものである。ここに謹んで謝意を表し、厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 畑野 正・堤 一：地震荷重を対象としたコンクリートの動的圧縮変形ならびに破壊，土木学会論文報告集，第67号，pp.19~26，1960年3月。
- 2) 岩井 哲・吉田 望・中村 武・若林 実：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。
- 3) Manjoin, M.J. : Influence of Rate of Strain and

Temperature on Yield Stresses of Mild Steel, Journal of Applied Mechanics, Vol.11, pp.A 211~A 218, Dec.1944.

- 4) 青木博文・加藤 勉・難波恒夫・佐藤亘宏：変断面鋼板引張材の変形能力に及ぼす試験温度，ひずみ速度の影響，日本建築学会論文報告集，第322号，pp.11~17，昭和57年12月。
- 5) 最上達雄・小林 淳：高速荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の耐力と変形に関する実験的研究，日本建築学会大会梗概集，pp.1579~1582，昭和53年9月，pp.1293~1294，昭和54年9月。
- 6) Jinichi Takeda, Hiroyuki Tachikawa, Kazuo Fujimoto : Deflection and Fracture of Reinforced Concrete Member Subjected to Dynamic Load, 関東地震50年記念地震工学シンポジウム，pp.69~76，1973年。
- 7) 睦好宏史・町田篤彦：鉄筋コンクリート橋脚モデルの動的特性に関する研究，第6回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.793~800，1982年12月。
- 8) 岩崎敏男・萩原良二：鉄筋コンクリート橋脚の動的耐力に関する実験的研究，第6回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.785~792，1982年12月。
- 9) 遠藤孝夫・田辺忠顕：鉄筋コンクリート柱部材の動的特性に関する研究，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.481~484，1983年6月。
- 10) Mahin, S. A. and Bertero, V. V. : Rate of Loading Effects on Uncracked and Repaired Reinforced Concrete Members, Report No. EERC 72-9, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California of Berkeley, Dec.1972.
- 11) Takeda, T., Nielsen, N. N. and Sozen, M. A. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proc. of A. S. C. E, Vol. 96, No. ST 12, pp. 2557~2573, Dec. 1970.
- 12) 荒川 卓ほか：鉄筋コンクリート柱の耐力と靱性に及ぼす繰返し載荷速度の影響，第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.325~328，1982年6月。
- 13) 三村長二郎ほか：RC橋脚や柱のじん性に及ぼす繰返し載荷速度の影響に関する実験的研究，鹿島建設技術研究所年報第31号，昭和58年6月。
- 14) 小坪清真：土木振動学，森北出版，pp.26。
- 15) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会。
- 16) たとえば建築物の耐震設計資料，日本建築学会。
- 17) 高岡宣善：構造材料の内部摩擦による減衰振動，土木学会誌，pp.62~67，昭和47年3月。
- 18) 桶口芳郎：工学材料の模型解析，土木学会誌，pp.6~10，昭和28年9月。
- 19) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，pp.38~41。

(1984. 3. 30・受付)