

ひずみ速度を考慮した鉄筋コンクリート部材 の動的非線形地震応答解析

PREDICTING THE NONLINEAR EARTHQUAKE RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN CONSIDERATION OF STRAIN RATE EFFECT

睦好 宏史*・町田 篤彦**・鶴田 和久***

By Hiroshi MUTSUYOSHI, Atsuhiko MACHIDA and Kazuhisa TSURUTA

It has been recognized that the behaviors of R/C members under dynamic loading are different from those under static loading due to strain rate effects of materials. This paper describes the effects of strain rate of reinforcing bars on the dynamic response of R/C structures subjected to earthquakes. In order to obtain accurately the dynamic response of R/C members subjected to earthquake motions, the new force-displacement model was proposed based on the effects of strain rate of reinforcing bars. The dynamic responses, especially accelerations, calculated using the proposed force-displacement model resulted in satisfactory agreement with the measured responses. Furthermore, the influences of strain rate on R/C structures subjected to actual earthquakes were clarified using the proposed force-displacement model.

1. まえがき

鉄筋コンクリート（以下RCと略記する）構造物の耐震性状に関する研究はこれまで数多く行われてきたが、従来の研究では一般に、地震時におけるRC部材の力学的特性は、静的外力下におけるものと同一であるとみなし、部材レベルの実験は静的載荷により行い、地震時におけるRC構造物の動的応答特性は、静的実験から得られた力学的特性をもとにして、減衰等を適宜考慮して計算により求められてきた。しかし、地震力は繰り返しを伴う動的な外力であり、地震力を受けるRC構造物の各部には、ある大きさの変形速度およびひずみ速度が生じている。既往の研究によれば、動的一方向あるいは動的正負繰り返し外力を受けるRC部材の耐力は、ひずみ速度による鉄筋の降伏点の上昇により、静的載荷によるものと比べて20~30%程度上昇することが報告されている^{1)~4)}。また、RC部材あるいは鋼部材を用いた振動実験からは、振動時の部材の動的応答特性は、静的復元力を用いることによって、ある程度の精度で計

算できることが示されている。しかし、より詳細にみれば、実験から求まった応答加速度は、静的な復元力を用いて計算した応答加速度より大きな値を示すことも指摘されている^{5)~8)}。これらのこととは、静的加力下における部材の力学的特性からだけでは、動的外力下における復元力特性あるいは応答加速度を精度よく求められないことを示唆している。したがって、動的外力下におけるRC部材の挙動を精度よく求めるためには、載荷速度の大きさによってはひずみ速度による鉄筋の応力の上昇等を考慮して、静的復元力モデルを部分的に修正する必要があると考えられる。しかし、過去における研究ではひずみ速度による材料特性の変化を復元力モデルに取り入れ、動的挙動を求めた例はほとんどなく、さらにひずみ速度効果が実際のRC構造物の動的応答特性に、どの程度影響を及ぼすのかも明らかにされていない。

本研究は、地震力を受けるRC部材の動的応答特性に及ぼすひずみ速度の影響を解明しようとしたものである。研究の実施にあたっては、以下の手順に従った。すなわち、まずRC部材の動的応答解析を静的復元力モデルを用いて行い、模擬地震波入力実験結果と比較することにより、従来の静的復元力モデルにおける問題点を提起した。次に、この問題点を解消するために、ひずみ速度が鉄筋の材料特性に及ぼす影響を考慮して、静的復

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

** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科(同上)
*** 学生会員 埼玉大学大学院(同上)

元力モデルを修正した動的復元力モデルを提案し、これを用いて応答解析を行い、このモデルの妥当性をRC部材の模擬地震波入力実験によって確かめた。さらに、この手法を実際のRC構造物にも適用し、実際の地震が作用した場合におけるRC構造物の応答特性に及ぼすひずみ速度の影響およびその程度についても明らかにした。

2. 振動台を用いたRC部材の模擬地震波入力実験

模擬地震波入力実験に用いた供試体は全部で6体である。これらの供試体の形状寸法は図-1に示すように、断面を $10 \times 15 \text{ cm}$ とし、高さを 60 cm と 40 cm の2種類にしたものであって、主鉄筋にD6(SD35)またはD10(SD30)を用いて引張鉄筋比を0.79%と1.18%とし、帶鉄筋にφ2またはφ3の丸鋼を用いて帶鉄筋比を0.09%と0.1%としたものである。これらの鉄筋比は、通常用いられている単一柱式鉄筋コンクリート橋脚

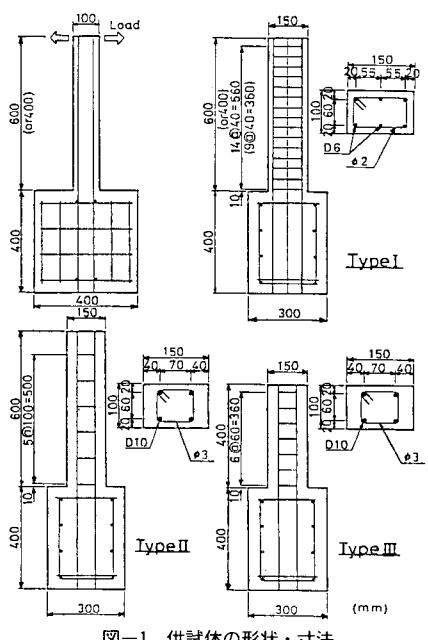


図-1 供試体の形状・寸法

表-1 模擬地震波入力実験に用いた供試体および実験要因

供試体No.	タイプ	高さ(cm)	引張鉄筋比 鉄筋(%)	帶鉄筋比 (%)	入力波形	コンクリートの圧縮強度(kg/cm ²)
S-1	I	60	3xD6, 0.79	0.1		
S-2	II	60	2x010, 1.18	0.09		
S-3	III	40	3xD6, 0.79	0.1		
S-4	III	40	2x010, 1.18	0.09		
S-5	I	40	3xD6, 0.79	0.1		
S-6	I	60	3xD6, 0.79	0.1	Taft	300 (29.4)

(): MPa

とほぼ同じとなるように定めた。表-1に各供試体の実験要因を示す。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 、圧縮強度が 300 kg/cm^2 となるように配合設計したものを用いた。振動実験を行うにあたって、供試体頭部に 833 kg のおもりを緊結した。これによる軸応力は 5.5 kg/cm^2 である。また、おもりを緊結するにあたっては、緊結部に働くおもりの回転慣性力によって付加的なモーメントが供試体に作用することを避けるために、おもりがその中心で自由に回転できるような固定治具を用いた。

入力地震波には、EL Centro 1940 N-S成分とTaft 1952 N-S成分をもととして、時間軸を $1/4$ に縮小し、最大加速度振幅を $2G$ となるように拡大したものを用いた。これは、供試体の固有周期($0.1\sim0.14 \text{ s}$)、おもりの重さおよび供試体の相似側などを考慮して、供試体の最大応答変位が1回の入力波によって $3\delta_y\sim4\delta_y$ (δ_y :降伏変位)に達することを目標として定めたものである。実験にあたっては、地震波を入力する前に自由振動実験を行い、固有振動数と初期減衰定数を求めたのち、おののの供試体につき上記の模擬地震波の1波形を1回入力した。

計測項目は、供試体頭部の正負両側とフーチング部の計3か所における加速度、供試体頭部の水平変位、橋柱部およびフーチング部の主鉄筋のひずみ等である。測定したデータはすべてデータレコーダーに収録し、その後A/D変換を行った。A/D変換のサンプリングタイムは 0.0012 s である。

3. 静的復元力モデルを用いた応答解析およびその問題点

(1) 静的復元力モデルの設定および応答解析

静的復元力モデルを設定するにあたって、スケルトンカーブ(骨格曲線)は以下のようにして求めた。すなわち、まずコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を仮定し、供試体断面を要素に分割して通常の曲げ理論の仮定に基づいてモーメント-曲率関係を逐一求め、これを供試体の高さ方向に沿って積分することにより、荷重-変

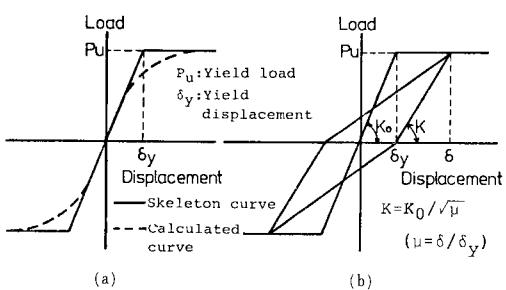


図-2 復元力モデル

位曲線を決定した⁹⁾。次に、これを弾性域の直線と、変位軸に平行で最大耐力を通る直線から成る完全弾塑性に近似してスケルトンカーブとした(図-2(a))。履歴曲線には、本実験に用いたような曲げ降伏型のRC部材の復元力特性を比較的精度よく表現することができるといわれている剛性劣化型バイリニアモデルを用いた¹⁰⁾(図-2(b))。各供試体の静的復元力モデルに用いた降伏荷重および降伏変位を表-2に示す。図-3は、以上のようにして定めた復元力モデルと、すでに行われた静的正負繰り返し実験¹¹⁾から得られた履歴曲線を比較して示したものである。図に示すように、定められた復元力モデルは、本実験で用いた供試体の静的履歴性状を比較的よく表現しているといえる。

応答解析は、模型供試体を一質点系とみなし、入力加速度に実験から得られたフーチング部の加速度記録を用いるとともに、時間刻みを0.0012sとして、Newmarkのβ法($\beta=1/6$)によって行った。この場合、運動方程式を解くにあたっては反復法を用い、許容加速度誤差(0.00001gal)以内に収まるまで繰り返し計算を行った。減衰については、地震波入力実験を行う前に自由振動実験を行って求めた減衰定数(h)を初期減衰とし、粘性減衰定数(c)に換算して用いた(表-2参照)。初期減衰を応答解析の中に取り入れる方法としては、以下に示す2通りの方法を用いた。1つは、従来の方法に従って、初期減衰を応答計算の全過程に考慮する方法であり、

表-2 静的復元力モデルに用いた降伏荷重および降伏変位

供試体 No.	降伏荷重 (P_u) (kgf)	降伏変位 (δ_y) (cm)	減衰定数(h) (%)
S-1	560 (5.49)	0.55	1.7
S-2	614 (6.02)	0.58	1.3
S-3	796 (7.80)	0.27	1.4
S-4	874 (8.57)	0.28	1.7
S-5	796 (7.80)	0.27	1.4
S-6	560 (5.49)	0.55	1.7

注1) 降伏荷重はコンクリートのひずみが3800μに達した時の荷重である。

注2) 減衰定数は自由振動実験から得られた。
() : KN

他の1つは、RC部材の降伏変位以降においては、履歴減衰が支配的であることを考慮して、初期減衰を降伏変位に達する前においてのみ考慮する方法である。

(2) 静的復元力モデルを用いた応答解析における問題点

図-4は実験から得られた地盤加速度、応答加速度、応答変位の時刻歴と、初期減衰を全過程に考慮して応答解析から得られた応答加速度および応答変位の時刻歴の一例を示したものである。応答解析には、表-2に示した減衰定数を用いた。図-4に示した応答加速度波形の位相および波形では、応答計算値は実験値と大体において一致しているが、応答加速度がピークをとる箇所では、計算値は実験値よりも小さな値を示している。表-3は試験したすべての供試体について、応答変位および応答加速度の最大値を示したもので、同表より、実験から得られた応答加速度の最大値は計算によるものよりも20~30%程度大きな値を示していることがわかる。すなわち、このことは、静的な手法で求めた復元力モデルを用いた応答解析によれば、地震動を受けるRC部材の応答加速度は過小に評価されることを示している。これと同じような研究結果がTakeda, 岡田らによても報告されている^{6), 7)}。

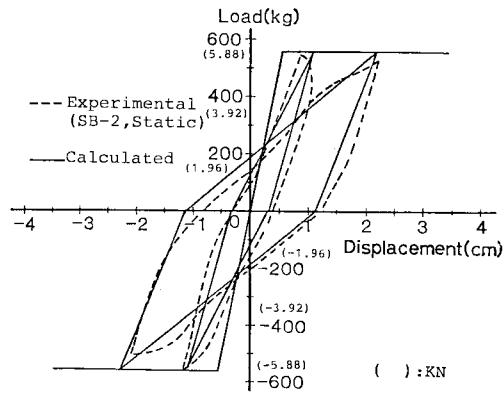


図-3 復元力モデルの比較

表-3 静的復元力モデルを用いた応答計算および実験から得られた応答加速度、応答変位の最大値

供試体 No.	実験値						計算値($h=0.0$)						計算値(初期減衰を考慮した場合)					
	最大応答変位			最大応答加速度			最大応答変位			最大応答加速度			最大応答変位			最大応答加速度		
	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均
S-1	2.9	2.7	2.8	779	826	802	2.6	2.6	2.6	702	659	681	2.3	2.5	2.4	702	688	695
S-2	2.6	2.4	2.5	1077	798	938	3.4	2.9	3.1	772	722	747	3.1	2.9	3.0	772	753	763
S-3	1.6	1.4	1.5	1465	1141	1303	0.8	3.1	1.9	936	948	942	0.7	2.9	1.8	1002	955	978
S-4	1.6	1.1	1.3	1633	1409	1521	1.8	1.6	1.7	1075	1028	1051	1.6	1.3	1.4	1075	1092	1083
S-5	1.6	0.8	1.2	1104	1304	1204	1.9	0.9	1.4	948	936	942	1.2	1.3	1.3	974	962	968
S-6	1.5	1.5	1.5	821	810	815	2.0	1.1	1.5	682	659	671	1.9	1.1	1.5	682	700	691

注1) 最大応答変位: cm, 最大応答加速度: gal

注2) S-1~S-4: El Centro, S-5~S-6: Taft

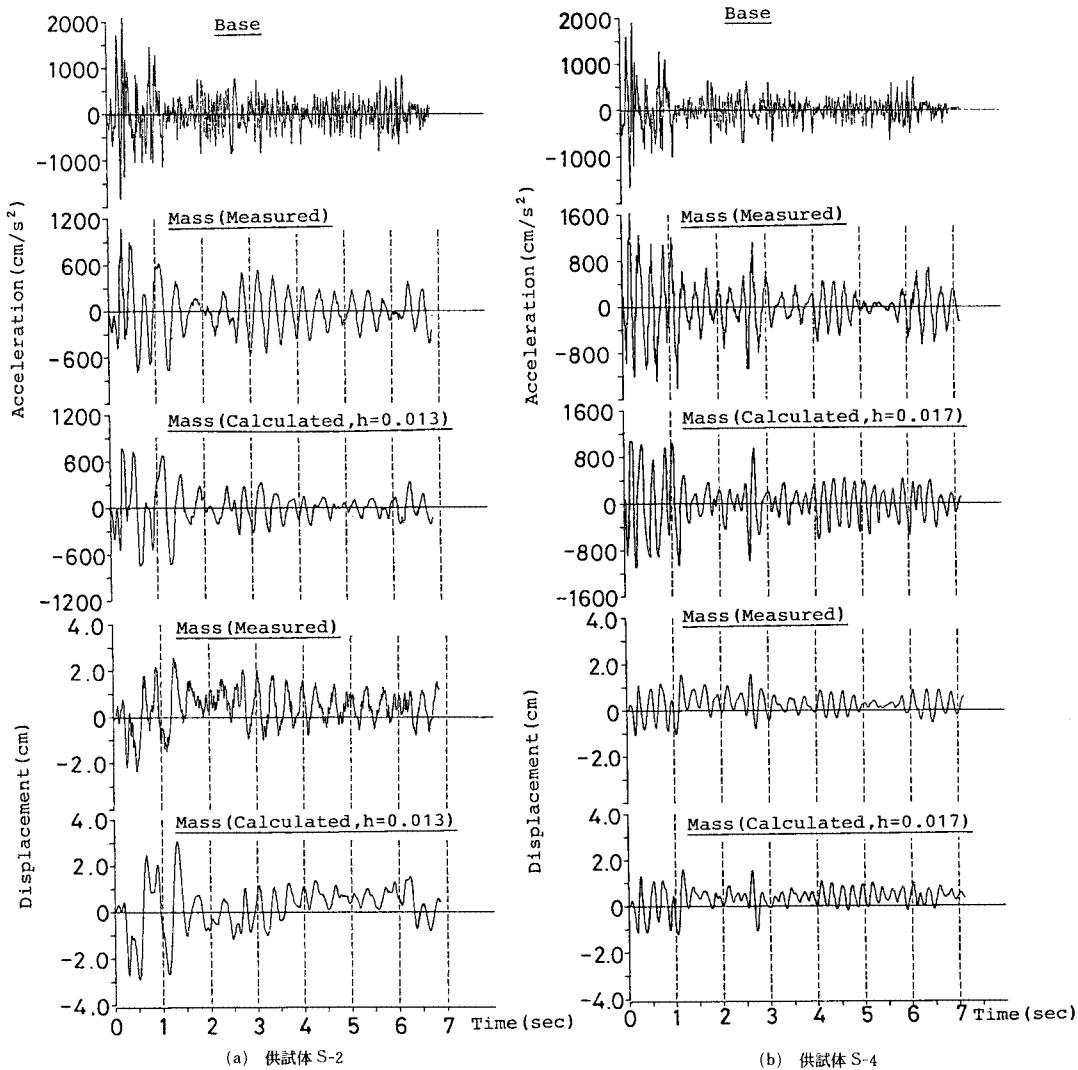


図-4 実験および応答解析から得られた応答波形(静的モデル)

既報⁴⁾で述べたように、動的正負繰り返し載荷を受けるRC部材では、変位が降伏変位を越えて折り返すとき、降伏変位を越える瞬間にある大きさのひずみ速度が鉄筋に生じ、これにより降伏点が上昇して耐力が増大する現象が示された。このことを考慮すると、地震力を受ける場合も、これと同様の現象によって加速度が大きくなつたものと想像される。これを明確にするために、実験から得られた応答加速度、応答変位、橋柱部とフーチング部界面の主鉄筋のひずみおよびひずみ速度の時刻歴を対比した。この結果の例は図-5のようである。図中における線分Aは静的復元力モデルを用いて、応答計算から得られた応答加速度の最大値を示したものである。同図において、計算値よりも大きな加速度が生じている箇所(a, b, c, d)における鉄筋のひずみに着目す

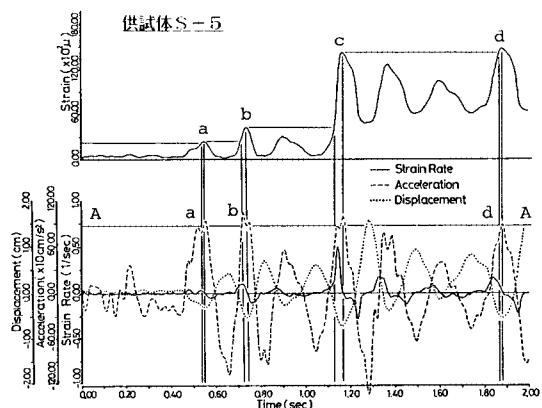


図-5 応答加速度、変位および鉄筋のひずみの時刻歴

れば、a点において鉄筋は降伏し、このとき線分Aより大きな加速度が生じていることがわかる。さらに、b, c点で大きなひずみ領域に入り、このとき同様に線分Aよりも大きな加速度が生じ、その後新たなひずみ領域に入るd点までは線分Aを越える加速度は生じておらず、d点でさらに大きなひずみ領域に入ったとき、線分Aを越える大きな応答加速度が生じていることも認められる。これらの点における鉄筋のひずみ速度に着目すれば、応答加速度が計算値よりも大きな値となるa, b, c, d点、すなわち加速度の折り返し点において、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。すでに報告したように¹⁾、動的一方向および繰り返し引張力を受ける鉄筋の応力は、降伏ひずみに達したとき、あるいは以前に経験したひずみより大きなひずみ領域に入る場合には、ひずみ速度効果により静的な場合に比べて増大することが確かめられている。このことより、振動実験から得られた応答加速度が静的復元力モデルを用いた応答解析によるものより大きくなったのは、ひずみ速度効果により鉄筋の応力が上昇し、これにより部材の耐力が増大したためと判断される。このような現象は、すべての供試体に認められたのであって、地震動を受けるRC部材においても、動的正負載荷実験でみられる現象と同じ現象が生じ得るのである。したがって、地震動を受けるRC部材の応答加速度を精度よく求めるためには、ひずみ速度による耐力の上昇を考慮した復元力モデルを用いることが必要であるといえる。

4. ひずみ速度による材料特性を考慮した動的復元力モデル

以上の結果に基づいて、本章では地震動を受けるRC部材の応答特性、特に応答加速度をより精度よく求める目的として、地震動を受けるRC部材の復元力モデルに、載荷速度により生じ得る実際の現象、すなわち鉄筋のひずみ速度による部材の耐力の上昇を忠実に取り入れた動的復元力モデルを提案するとともに、このモデルの妥当性を確かめる。

RC 部材の動的復元力モデルを定めるにあたって、以下のようない仮定を設定した。

1) 動的復元力モデルに用いる曲げ耐力は、鉄筋のひずみ速度による上降伏点および下降伏点の上昇を考慮するものとする。この場合、図-6に示すように、ひずみ速度による鉄筋の上降伏点の上昇は正負両方向において1回のみ考慮し、2回目に再載荷された場合には下降伏点を用いる。また、同一変位で、3回以降繰り返された場合には、静的載荷された場合の降伏応力を用いるものとする。

2) 動的復元力モデルのスケルトンカーブには、静的

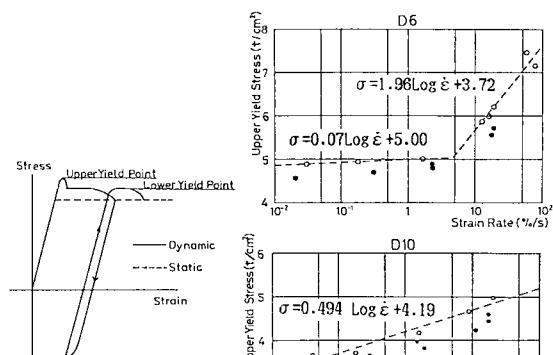


図-6 動的繰返し引張力を

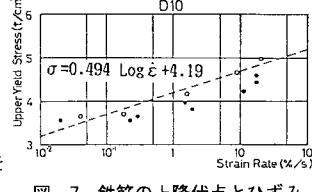


図-7 鉄筋の上降伏点とひずみ速度の関係

復元力モデルのスケルトンカーブを鉄筋の降伏点の上昇に伴うRC部材の耐力の増分量によって逐一修正したもの用いる。

3) 復元力が降伏荷重よりも小さい場合には、ひずみ速度による影響は考慮しない。

4) 履歴法則は静的復元力モデルに従うものとする。
 以上の仮定は、すでに報告した研究成果⁴⁾に基づいて、
 動的外力を受けるRC部材の力学的特性と動的繰り返し引張力を受ける鉄筋の応力-ひずみ特性を忠実に反映したものである。次に動的復元力モデルを設定する手順について説明する。まず、静的復元力モデルのスケルトンカーブを設定する場合に用いた手法[3.(1) 参照]により、RC部材の荷重、変位および主鉄筋のひずみの相互関係をそれぞれ求めた。鉄筋が降伏するまでは、供試体頭部の変位と鉄筋のひずみとの関係は式(1)で表わされる。

ここで、 ε ：主鉄筋のひずみ、 δ ：供試体頭部の変位。

a : 定数

式(1)を時間 t で微分すれば変位速度とひずみ速度の関係が求まる。

ここで、 $\dot{\epsilon}$:ひずみ速度、 $\dot{\delta}$:変位速度

上記の式は鉄筋が降伏するまでの変位速度とひずみ速度の関係を表わしているが、鉄筋が降伏した後（降伏変位を越えた後）においても上記の関係は成り立つものとする。本実験で用いた鉄筋（D 6 および D 10）の上降伏点および下降伏点とひずみ速度の関係はすでに求められているので⁴⁾（図-7）ひずみ速度が定まれば鉄筋の各降伏点は求まり、RC 部材の動的曲げ耐力を計算することができる。図-7 に示すように、鉄筋の降伏点はひずみ速度の対数と直線関係になるので、動的曲げ耐力もひ

ずみ速度の対数と直線関係となり、式(3)が成り立つ。

$$P = b \cdot \log \dot{\varepsilon} + d \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 P ：ひずみ速度を考慮した動的耐力、 b 、 d ：

定数

以上の関係から、変位速度が定まれば、式(2)より鉄筋のひずみ速度が求まり、さらに式(3)を用いて、ひずみ速度による動的耐力が定まることになる。これを応答計算の中に組み入れるのである。すなわち、ある時刻における応答速度が求まるとき、これから鉄筋のひずみ速度効果による動的耐力が求まり、これを静的復元力モデルのスケルトンカーブに置き換えて計算を進めていくのである。以上述べた計算過程を図-8に示す。

図-9は以上によって得られた動的復元力モデルを示したものである。履歴法則は静的復元力モデルと同様で

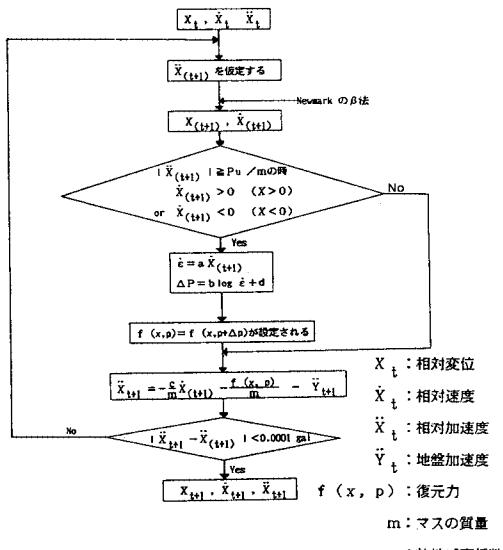


図-8 動的復元力モデルの計算過程

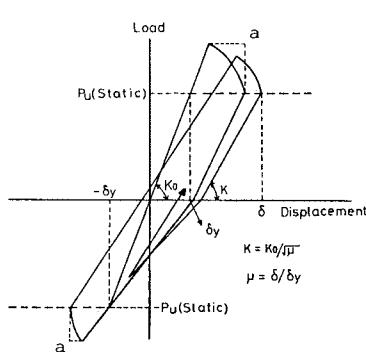


図-9 動的復元力モデル

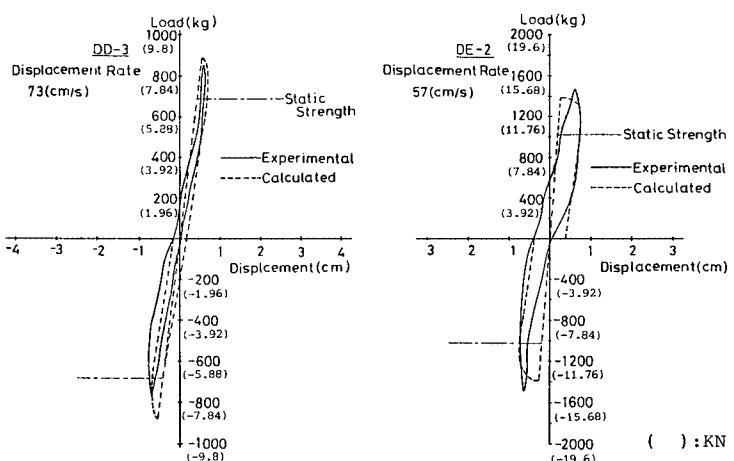


図-10 動的正負繰り返し実験から得られた復元力⁴⁾と動的復元力モデルの比較

あるので、荷重0の軸を横切って、除荷から逆方向に載荷が行われる場合には、最大経験点を指向する。しかし、図に示すように動的復元力モデルでは、変位の最大点と荷重の最大点が異なる。そこで、統一した指向点を定めるため、図に示すように、過去に経験した変位の最大点と荷重の最大点の両者から定まる座標(図ではa点)を動的復元力モデルの最大経験点とした。図-10はすでに行われた動的正負繰り返し載荷実験⁴⁾から得られた復元力の一例と上で述べた方法を用いて得られた動的復元力の計算値を比較したものである。計算には実験から得られた各時刻ごとの変位速度の実測値を用いた。図に示すように、本解析によって得られた動的復元力モデルは実験から得られた復元力と比較的よく一致しているといえる。

5. 動的復元力モデルを用いた応答解析結果

本章では、4. で述べた動的復元力モデルを用いて、3.(1) で述べた手法により応答計算した結果について述べる。図-11は模擬地震波入力実験から得られた地盤加速度、応答加速度、応答変位の時刻歴と動的復元力モデルを用いて、初期減衰を降伏変位以降において考慮していない場合について計算した応答加速度、応答変位の時刻歴を示したものである。図に示すように、各時刻歴の応答加速度について注目すれば、静的復元力モデルを用いた場合には加速度の各ピーク値における計算値は実験値より小さい値を与えていたのに対し、動的復元力モデルではそのような傾向は認められず、両者はよく一致している。

表-4は上記の応答計算および実験から得られた最大応答加速度と最大応答変位についてまとめたものであり、図-12は、供試体S-1～S-4(El Centro 使用)について、上記の最大応答値の計算値と実験値の比を図示

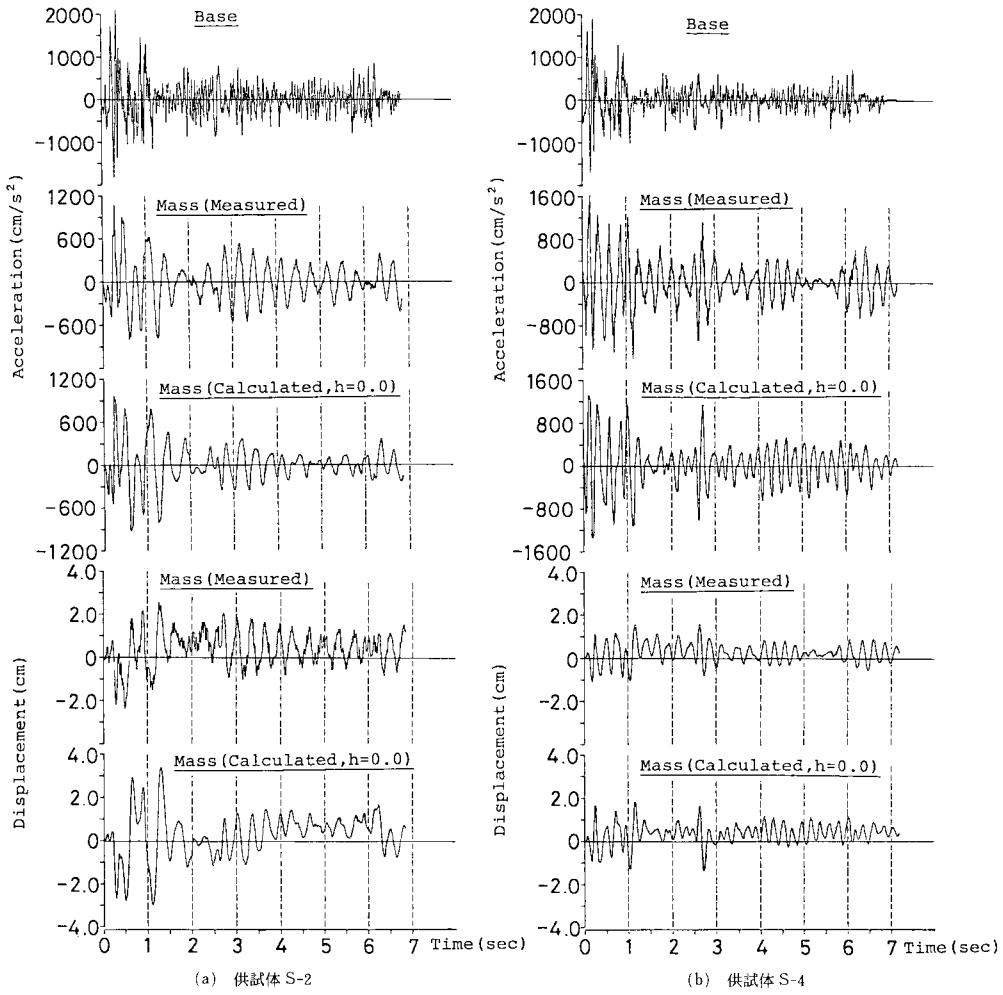


図-11 実験および応答解析から得られた応答波形（動的復元力モデル）

表-4 動的復元力モデルを用いた応答計算および実験から得られた応答加速度、応答変位の最大値

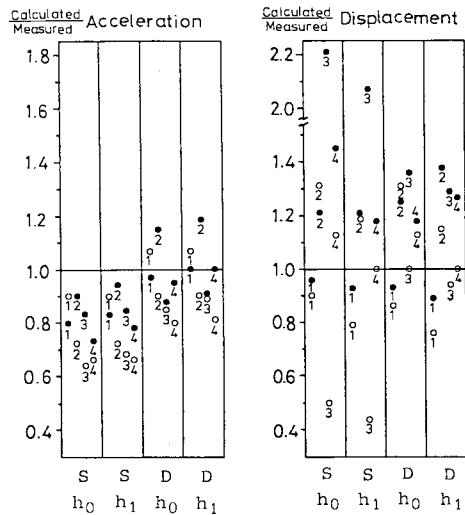
供試体 No.	実験値						計算値 ($h=0.0$)						計算値 (初期減衰を考慮した場合)					
	最大応答変位			最大応答加速度			最大応答変位			最大応答加速度			最大応答変位			最大応答加速度		
	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均
S-1	2.9	2.7	2.8	779	826	802	2.5	2.5	2.5	832	804	818	2.2	2.4	2.3	832	828	830
S-2	2.6	2.4	2.5	1077	798	938	3.4	3.0	3.2	964	917	940	3.0	3.3	3.2	965	946	956
S-3	1.6	1.4	1.5	1465	1141	1303	1.6	1.9	1.8	1242	1004	1123	1.5	1.8	1.7	1298	1042	1170
S-4	1.6	1.1	1.3	1633	1409	1521	1.8	1.3	1.6	1313	1342	1328	1.6	1.4	1.5	1329	1415	1372
S-5	1.6	0.8	1.2	1104	1304	1204	1.6	1.3	1.5	1004	983	993	1.2	1.4	1.3	1045	995	1020
S-6	1.5	1.5	1.5	821	810	815	2.1	1.1	1.6	750	806	778	2.0	1.1	1.6	750	843	797

注1) 最大応答変位: cm, 最大応答加速度: gal

注2) S-1～S-4: El Centro, S-5～S-6: Taft

したものである。図には比較のために、静的復元力を用いた計算値も示している。これらの表および図から、静的復元力モデルを用いた最大応答加速度の計算値は、実験値より20～30%程度小さな値を与えるのに対し、動

的復元力モデルでは、ほぼ実験値と等しい値を与えていことがある。このことより、地震動を受けるRC部材の応答加速度を精度よく求めるためには、4.で提案したようなひずみ速度による鉄筋の降伏点の上昇を考



(注) ○: 正側の応答値, ●: 負側の応答値
S: 静的復元力モデル, D: 動的復元力モデル
1~4: 供試体の番号
h0: h=0.0, h1: 初期減衰を考慮

図-12 応答解析および実験から得られた最大応答値の比

慮した動的復元力モデルを用いることが必要であるといえる。

図-13は、a) 実験から得られた復元力-変位関係、b) 静的復元力モデルを用いて、初期減衰を計算の全過程に考慮して得られた復元力-変位関係、c) 動的復元力モデルを用いて、初期減衰を降伏変位以降に考慮しない場合の復元力-変位関係をそれぞれ示したものである。この場合、実験から得られた復元力は、おもに中心において実測された加速度とおもりの質量との積^{3), 4)}とした。この図より、静的復元力モデルを用いたものは復元力が頭打ちとなり、実験値にみられるようなピークが認められないが、動的復元力を用いたものはこの点が改善され実験値により近い形状となっていることがわかる。

最大応答変位については、これまでの研究により⁵⁾,

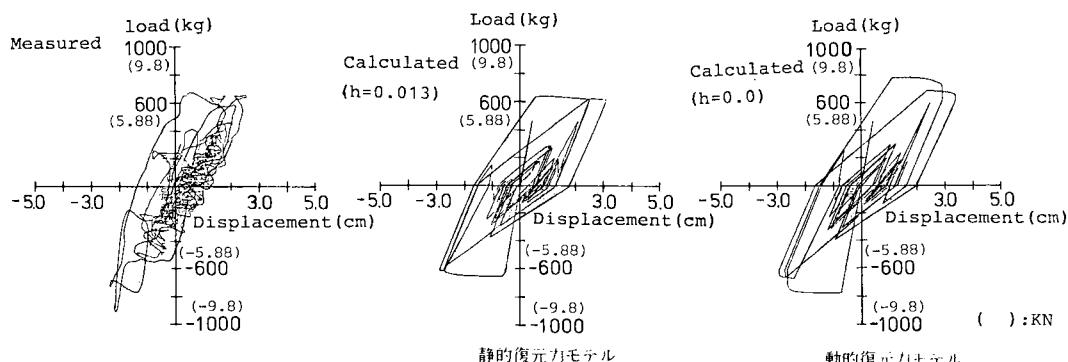


図-13 実験から得られた復元力-変位関係と各モデルから計算された復元力-変位関係（供試体 S-2）

応答計算の全過程において初期減衰を考慮した方が実験値と計算値はよく一致することが認められている。一般に、応答解析を行う場合には、減衰が部材の応答に及ぼす影響は大きいにもかかわらず、減衰のとり方に関しては不明瞭にされている場合が多い。そこで、この点についても検討を加えた。図-12に示すように、初期減衰を静的復元力モデルの全過程において考慮した場合（図中の記号で S, h₁）と、動的復元力モデルを用いて、降伏変位以降において初期減衰を考慮しない場合（同じく、D, h₀）では、両者の計算値はほぼ同程度の値を示しており、いずれも実験値ともよく一致していることがわかる。このことは、動的復元力モデルを用いて応答計算を行う場合、降伏変位以降において速度依存型の初期減衰を考慮しなくとも、静的復元力モデルに初期減衰を計算の全過程に考慮した場合と同程度の精度で RC 部材の応答変位を計算できることを示している。

以上述べたように、ひずみ速度による耐力の上昇を取り入れた動的復元力モデルを用いることによって、従来の静的復元力モデルを用いた場合の問題点が解消され、応答加速度あるいは応答変位はより精度よく求められることが示された。また、このことは、提案した動的復元力モデルは、地震力を受ける RC 部材の力学的特性の真に近い現象を忠実に表現しているともいえる。

6. 実際の RC 構造物への適用

以上で述べたように、鉄筋のひずみ速度による材料特性の変化を考慮した動的復元力モデルの妥当性が確かめられた。しかし、模型実験では供試体の固有周期が実物よりも小さくなること、さらに入力地震波の加速度振幅が実際よりも大きいことなどのために、模型供試体のひずみ速度は実際の構造物に比べて大きくなり、これが応答値に及ぼす影響も過大評価していると考えられる。そこで、上で述べた手法を実際の RC 構造物に適用し、実際の地震動が作用した場合の実構造物に及ぼす

ひずみ速度の影響およびその程度を確かめることにした。

計算に用いたRC構造物は、建設省の標準設計による単一柱式RC橋脚のうちの2体で¹²⁾、1体は高さ7m、固有周期が約0.5sで、他の1体は高さ12m、固有周期が約0.8sのものである。その概形を図-14に示す。

応答解析を行うにあたっては、橋脚は1質点系モデルと仮定し、質点モデルの質点質量は、1径間の桁の質量に橋脚本体の質量の1/3を加算したものとした¹³⁾。応答解析には4.で述べた動的復元力モデルと3.(1)で述べた手法を用いた。この場合、これらの橋脚のスケルトンカーブは、太田によって計算された荷重-変位曲線から定めたものを用いた¹²⁾。また、RC橋脚に使われている鉄筋のひずみ速度と降伏点の関係は不明であるので、やむを得ず著者らが行った鉄筋の動的引張試験結果から最も径の大きいD19の試験結果を代用した²⁾。ひずみ速度と降伏点との関係は、鉄筋が相違しても極端に相違することはないので、代用したことが結果に大きな影響を及ぼさないと考えられる。計算に用いた入力地震波には、EL Centro 1940 N-S成分およびTaft 1952 N-S成分を用い、最大加速度振幅を両者ともに326 galとし、時間軸も実際のものを使用した。計算に用いた諸元を表-5に示す。

表-6は、以上のようにして行った応答計算の結果について示したものである。これによると、最大応答速度

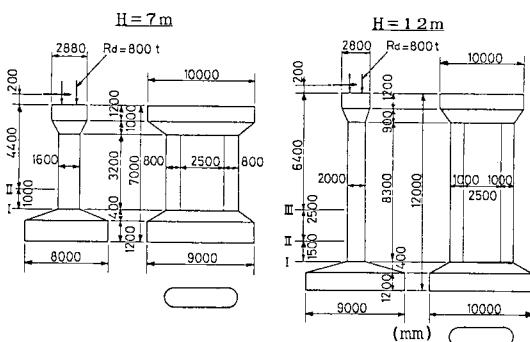


図-14 計算に用いたRC橋脚の形状寸法

表-5 計算に用いた鉄筋コンクリート橋脚の諸元

橋脚	降伏荷重(Pu)(tonf)	降伏変位(δ_y)(cm)	質点重量(ton)	固有周期(秒)
H=7m	270 (2646)	1.80	857.4 (8403)	0.48
H=12m	284 (2783)	4.98	897.6 (8796)	0.80

() : KN

は、El Centro および Taft とともに、H=7 m の橋脚の場合は、40~60 cm/s であり、H=12 m の場合は、60~70 cm/s である。また、応答解析から得られた最大応答加速度に注目すると、動的復元力モデルを用いて計算した最大応答加速度は、El Centro および Taft とともに、静的復元力モデルを用いたものより 10~20 % 程度大きな値を示していることがわかる。これから明らかなように、実際の RC 構造物においても、地震力が作用する場合には、応答加速度が静的復元力モデルから計算されるものより十分大きくなるのである。

このような応答加速度の上昇が構造物本体に、以下に述べるような影響を及ぼす。一般に用いられている鋼材等の実降伏点は公称値よりも大きな値をとるため、構造物の耐力は設計計算による耐力よりも大きくなることが考えられる。これにひずみ速度による耐力の上昇が加われば、構造物に種々の悪影響を及ぼすのである。悪影響の一例として、たとえば、構造物本体には計算よりも大きなせん断力が作用することが考えられる。既往の研究^{2), 4), 14)}によれば、動的荷重を受ける RC 部材のせん断耐力は、載荷速度に応じて上昇するが、鉄筋が降伏した場合には、その耐力は急激に減少し、せん断破壊が生じる危険性があることが指摘されている。したがって、曲げ耐力の上昇がせん断耐力に及ぼす影響に関しては十分注意が必要である。さらに応答加速度の上昇により、構造物本体以外の二次構造物（たとえば RC 橋脚の場合には、橋脚天端にある支承等、RC 建造物の場合には、建物の屋上にある水槽、鉄塔あるいは建物内に設置される機器類等）にも大きな地震力が作用することが考えられるので、これらの耐震設計については十分留意することが必要となるのである。

表-6 応答計算結果(h=0.0)

地震波	橋脚	最大応答変位(cm)			最大応答速度(cm/s)			最大応答加速度(gal)		
		正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均
El Centro	H=7m	7.5	5.1	6.3	58	46	52	386 (1.25)	373 (1.21)	379 (1.23)
	H=12m	10.7	9.5	10.1	70	70	70	369 (1.19)	367 (1.18)	368 (1.19)
Taft	H=7m	5.6	4.7	5.2	41	44	42	378 (1.19)	372 (1.20)	375 (1.22)
	H=12m	9.0	9.8	9.4	58	73	66	337 (1.09)	362 (1.17)	349 (1.13)

注) () 内は静的復元力モデルを用いた場合の応答加速度との比

7. 結論

本研究は、地震力を受けるRC部材の動的応答特性に及ぼすひずみ速度の影響を模擬地震波入力実験と動的復元力モデルを用いた非線形応答解析を行うことによって、明らかにしたものである。本研究をまとめると以下のようになる。

(1) 従来用いられてきた静的復元力モデルでは、地震動を受けるRC部材の応答加速度を過小に評価することが認められた。これは、地震力を受ける場合のRC部材の耐力は、ひずみ速度効果によって鉄筋の降伏点が上昇し、静的外力下におけるものより大きくなるからである。

(2) 動的外力を受けるRC部材の復元力に、載荷速度により生じる実際の現象、すなわち鉄筋のひずみ速度による耐力の上昇を取り入れた動的復元力モデルを提案した。動的復元力モデルを用いることにより、動的正負繰り返し外力を受けるRC部材の復元力特性を比較的精度よく模擬できることが明らかとなり、提案したモデルの妥当性が示された。

(3) 動的復元力モデルを用いて応答解析を行った結果、応答加速度に関しては、従来の静的復元力モデルの問題点が解消され、より精度よく求まることが確かめられた。また、応答変位に関しては、動的復元力モデルでは、降伏変位以降において、速度依存型の初期減衰を考慮しなくとも、静的復元力モデルに初期減衰を考慮した場合と同程度の精度でRC部材の応答変位を求めることが可能であることが認められた。すなわち、提案した動的復元力モデルは、地震動を受けるRC部材の真に近い現象を忠実に表現しているといえる。

(4) 動的復元力モデルを、実際のRC橋脚に適用し、実際の地震波が作用した場合に生じるひずみ速度の影響を調べた結果、応答加速度は静的復元力モデルを用いた場合よりも20%程度上昇することが認められた。このような応答加速度の増大が生ずれば、構造物本体あるいは構造物本体以外の二次構造物には、予想外の大きな地震力が作用することになるので、これらの耐震設計については十分注意することが必要である。

謝 辞：本研究を行うにあたって、東京大学教授岡村甫先生、小林一輔先生、青山博之先生、片山恒雄先生、同助教授小谷俊介先生から多くの貴重なご助言を頂いた。また、埼玉大学教授田島二郎先生からはご懇切なるご指導を賜った。さらに、振動実験を行うにあたって、土木研究所の岩崎敏男部長ならびに萩原良二主任研

究員から多大なご援助を頂いた。元埼玉大学生の佐原正および野中信孝両氏には実験を行うにあたってご協力を頂いた。ここに謹んで謝意を表し、厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 最上・小林：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（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1579～1582，昭和53年9月，同題（その2），pp.1293～1294，昭和54年9月。
- 2) 睦好宏史・町田篤彦：動的荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性及び破壊性状，第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集，1984年。
- 3) Mutsuyoshi, H. and Machida, A. : Dynamic Properties of Reinforced Concrete Piers, 8th World Conference on Earthquake Engineering, 1984.
- 4) 睦好宏史・町田篤彦：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，土木学会論文報告集，第354号，1985年2月。
- 5) 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 at Berkeley, Dec. 1972.
- 6) Takeda, T., Nielsen, N. N. and Sozen, M. A. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proc. of American Society of Civil Engineers, Structural Engineering Division, Vol. 96, No. ST 12, pp. 2557～2573, Dec. 1970.
- 7) 久野・岡田・関：鉄筋コンクリート立体模型の振動破壊実験（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1309～1310，昭和51年10月，同題（その2），pp.1887～1888，昭和52年10月。
- 8) 加藤・秋山・鈴木・深沢：鋼構造模型の動的崩壊実験，日本建築学会論文報告集，第241号，昭和51年3月。
- 9) Park, R. and Paulay, T. : Reinforced Concrete Structures, pp. 254～269.
- 10) Clough, R. W. and Johnston, S. B. : Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements, Proc. of Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 227～232, 1966.
- 11) 北川・長瀧：変形速度及び応力緩和効果を考慮した応答解析手法（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.843～846，昭和57年10月。
- 12) 太田 実：单一柱形式鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法に関する研究，土木研究所報告，第153号，昭和55年3月。
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V. 耐震設計編，昭和55年5月。
- 14) 睦好宏史：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，昭和59年12月。

(1985.3.14・受付)