

# 論文 エネルギーの釣り合いに基づく鉄筋コンクリート造建物の弾塑性 応答性状に関する研究

日野 泰道\*<sup>1</sup>・北嶋 圭二\*<sup>2</sup>・中西 三和\*<sup>3</sup>・安達 洋\*<sup>4</sup>

要旨：本研究は、鉄筋コンクリート造建物の基本的な弾塑性応答性状をエネルギーの釣り合いという観点から検討したものである。検討の結果、地震によるエネルギー入力と建物のエネルギー吸収というエネルギー収支の関係は、S造、RC造という構造種別に依存せずに評価できることを明らかにした。また、エネルギー吸収性能が明確なダンパーを建物に組み込むことより、耐震性能を向上させる1つの方法を提案した。

キーワード：弾塑性応答性状、鉄筋コンクリート造建物、エネルギー応答、エネルギーバランス

## 1. はじめに

地震の荷重効果をエネルギー入力としてとらえ、建物の耐震安全性確保をエネルギー吸収能力に期待する耐震設計法の考え方がある[1]。この考え方は、部材のエネルギー吸収能力が明確な鉄骨造（以下、S造）の設計法として導入されているものの、エネルギー的な損傷評価が複雑な鉄筋コンクリート造（以下、RC造）の設計法には、いまだ明確な形で導入するまでには至っていない。エネルギー論的設計法がRC造建物の確固たる設計法として定着するためには、まずRC造建物の弾塑性応答性状をエネルギー的に評価する必要があると思われるが、このような観点に基づいた研究例は少ない。一方、筆者らは、これまでRC造柱の振動台実験およびパラメトリックな地震応答解析を行い、水平2方向地震力を考慮した場合でもRC造建物の弾塑性応答性状が、エネルギー的に評価できることを明らかにしてきた[2]、[3]、[4]。

本研究は、これらの知見を発展させるために、RC造建物の基本的な弾塑性応答性状を、エネルギーの釣り合いという観点から再検討したものである。ここではRC造建物の挙動を模擬する比較的単純な解析モデルを用いて、1質点系RC造建物のパラメトリックな地震応答解析を行い、より広範囲な入力条件に対して、その応答性状について検討した。そして、これらの検討結果は、S造、RC造というような構造種別に依存するものではないことを明らかにし、S造に対して得られているこれまでのエネルギー論的知見が、RC造にも適応可能であることを示唆した。さらに、RC造建物の耐震性能を向上させるための1つの方法として、建物にエネルギー吸収性能が明瞭なダンパーを組み込むことを提案し、その有効性についても検討した。

## 2. 1質点系RC造建物の弾塑性応答性状

### 2.1 解析諸元

1質点系の弾塑性解析に用いた履歴モデルを図1に示す。履歴モデルは、S造建物としてバイリニアモデル、RC造建物として武田モデルの2つのモデルを使用した。降伏耐力は、

---

\*1日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 (正会員)  
 \*2(株)青木建設 研究所建築研究室、工博 (正会員)  
 \*3日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科、工博 (正会員)  
 \*4日本大学教授 理工学部海洋建築工学科、工博 (正会員)

0.1W~0.5Wまで0.1W刻みで設定した（Wは建物重量）。弾塑性解析における減衰は、研究の問題点を明確にするため、非減衰系とした。建物の弾性固有振動数は、0.5Hz~0.9Hzを0.1Hz刻み、1.0Hz~7.0Hzを1.0Hz刻みの計12種類とした。解析に用いた地震波は、El Centro、Taft、Hachinoheの原波形NS、EW成分である。入力地震波諸元を表1に示す。地震継続時間は、最大応答値が全継続時間で解析した結果と変わらないことを確認した上で、各地震波ともに15秒として使用した。ただし総エネルギー入力、全継続時間に入力される量の約80~90%であった。運動方程式の数値積分法は、Newmark  $\beta$  法 ( $\beta=1/6$ ) とし、時間刻みは $\Delta t=0.002$ 秒とした。なお、弾塑性解析を行った際、塑性率が1.0を越えなかったもの（降伏しないもの）については削除した。

表1. 入力地震波諸元

入力波	<NS>	<EW>
El Centro	3417	2101
Taft	1527	1759
Hachinohe	2250	1829

単位 [mm/sec]

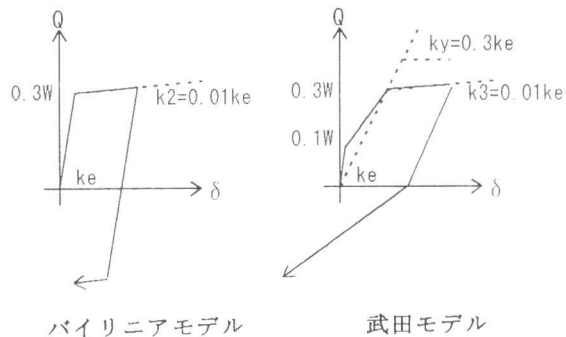


図1. 解析モデル

## 2.2 最大応答変位と総エネルギー入力の関係

上記の解析パラメータのうち、降伏耐力0.3W、入力地震波El Centro<NS>の弾塑性解析で得られた、各建物の最大応答変位と総エネルギー入力の等価速度  $V_E$  [L] の関係を図2に示す。○はバイリニアモデル、□は武田モデルの解析結果である。同図には、減衰定数10%の弾性解析（弾性固有振動数：0.1Hz~7.0Hzを0.01Hz刻み）で得られた最大応答変位- $V_E$ 関係もあわせて実線で示した。弾塑性解析で得られた最大応答変位- $V_E$ の関係には、履歴モデルの違いによる有意な差が見られない。また、両モデルの弾塑性解析結果はともに、最大変位が10~15cmのところ、弾性解析結果との差が若干見られるものの、全体的には概ね弾性解析結果と類似した性質を示していることが分かる。すなわち、弾塑性系の入力（総エネルギー入力）と応答（最大応答変位）の関係は、弾性系の入力と応答の関係と同じ性質を示し、その性質は、建物の振動数や履歴モデルには依存しない関係であることが図よりうかがえる。

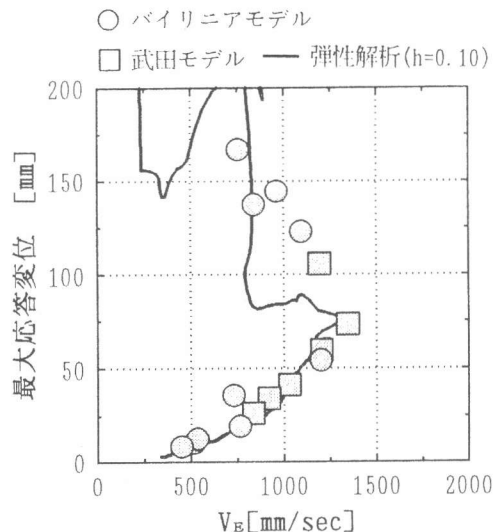


図2. 最大応答変位と  $V_E$  の関係

## 2.3 弾塑性解析結果と弾性応答スペクトルの関係

### 2.3.1 等価固有振動数

次に、武田モデル(0.3W)、ElCentro<NS>の弾塑性解析で得られた  $V_E$  の値を、各弾性固有振動数に対応させてプロットし図3に示す。また同図には、減衰定数

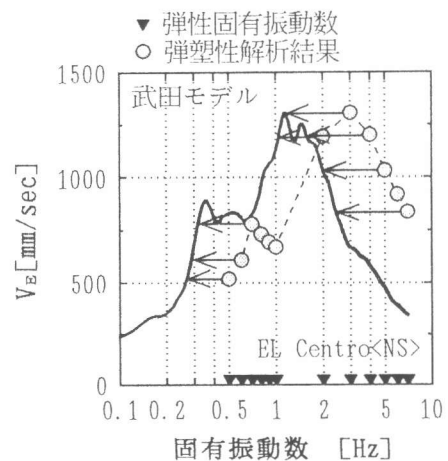


図3.  $V_E$  スペクトル

10%の弾性系の $V_E$ スペクトル（実線）もあわせて示した。弾塑性系のスペクトル（点線）は、弾性系の $V_E$ スペクトルと類似した形をしていることがわかる。そこで、弾性固有振動数に対応させてプロットした弾塑性解析結果を $V_E$ スペクトルと一致させるように低振動数方向にシフトさせ（図3の矢印）、弾性系の総エネルギー入力と等価になる固有振動数を等価固有振動数( $f_{eq}$ )と定義した。弾塑性解析時と等価固有振動数による減衰定数10%の弾性解析時の総エネルギー入力換算速度の時刻歴を比較したのが図4である。弾塑性解析結果は、弾性解析結果と入力地震波継続時間全般に渡り良い対応を示していることがわかる。また、等価固有振動数( $f_{eq}$ )と弾塑性解析時の弾性固有振動数( $f_e$ )の比( $f_{eq}/f_e$ )を固有振動数比と定義し、全ての入力地震波に対して固有振動数比を算定した。図5には $Q_y=0.3W$ の各履歴モデルごとの固有振動数比と弾性固有振動数の関係を、図6には固有振動数比と塑性率の関係を示す。なお、図中の直線は、固有振動数比の平均値（以下、算定係数）を示しており、武田モデルで0.42（標準偏差 0.08）、バイリニアモデルで0.80（同 0.14）であった。また、算定係数と降伏耐力の関係は、図7に示すように各履歴モデルともに降伏耐力が大きくなると、算定係数も大きくなる傾向を示した。本来、固有振動数比は、塑性率の影響を受ける量だと考えるが、同じ降伏耐力においては図6に示すように、それによる影響があまり見られない。したがって、簡便性という観点から以下の検討では、算定係数を用いて等価固有振動数を算出することとした。

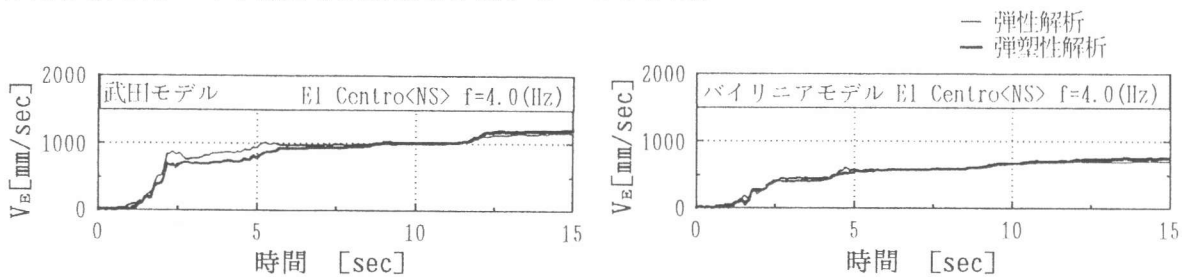


図4. 総エネルギー入力換算速度の時刻歴

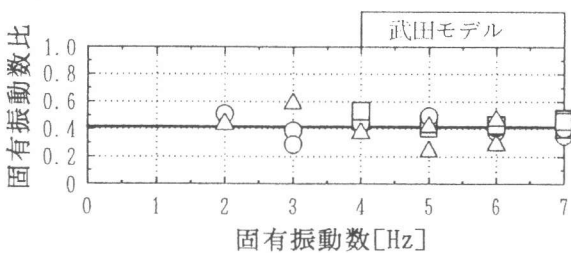


図5. 固有振動数比と弾性固有振動数の関係

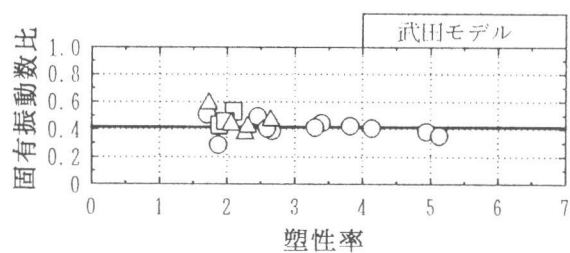


図6. 固有振動数比と塑性率の関係

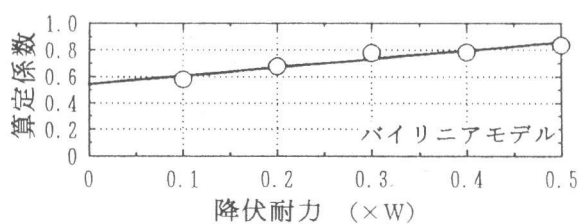
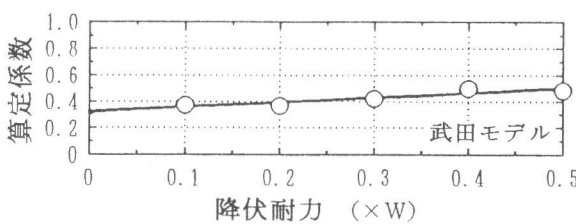


図7. 算定係数と降伏耐力の関係

### 2.3.2 弾塑性解析結果と弾性解析で得られた最大応答変位および $V_E$ の関係

ここでは、弾塑性解析結果と弾性解析で得られる最大応答変位および総エネルギー入力について検討する。算定係数を用いて求めた等価固有振動数に対して、弾塑性解析結果( $Q_y=0.3$ )

をプロットし、弾性系の $V_E$ スペクトルおよび変位応答スペクトルと比較した。各入力地震波ごとの結果を図8、図9に示す。図より、各履歴モデルの弾塑性解析結果は、弾性系の $V_E$ スペクトルおよび変位応答スペクトルともに良い対応を示していることがわかる。降伏耐力を0.1W, 0.2W, 0.4W, 0.5Wとした場合についても、ほぼ同様の対応が見られた。

以上の検討より、非減衰弾塑性系の応答値（最大応答変位と総エネルギー入力）は、復元力特性の形態や入力地震波特性、さらには建物の固有振動数に依存せず、総エネルギー入力に等価な弾性系の応答値で評価できることがわかった。したがって、RC造建物の弾塑性応答性状についても、地震により入力されるエネルギーに対して建物が消費する、もしくは応答するというエネルギー論的な評価が可能であり、これは、S造またはRC造という構造種別には依存しない基本的な評価方法と言える。

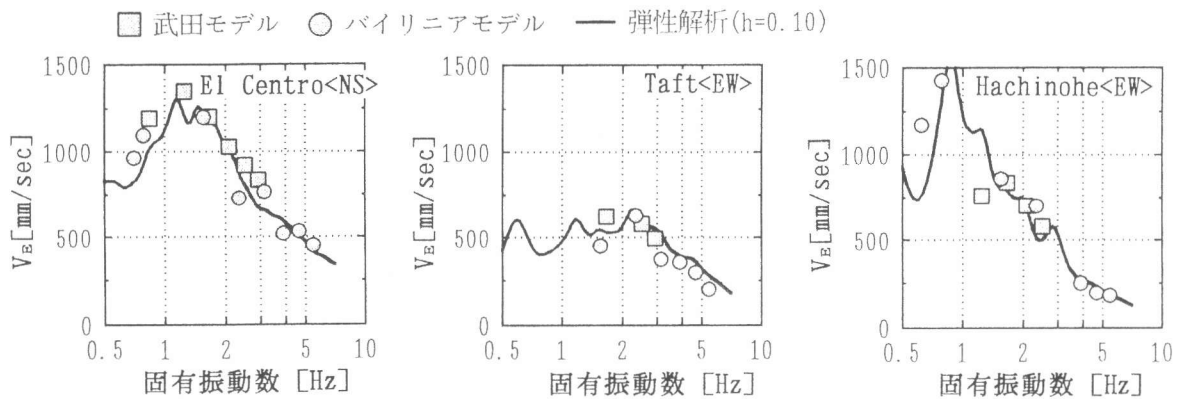


図8.  $V_E$ スペクトル

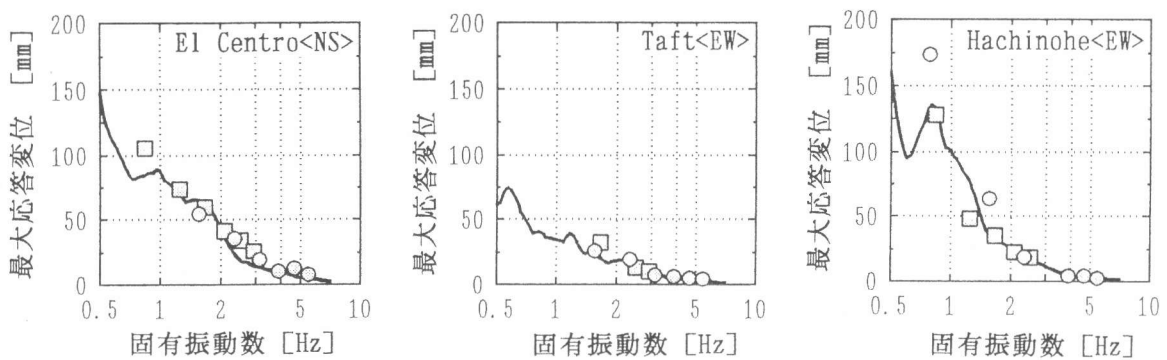


図9. 変位応答スペクトル

### 3. エネルギー吸収部材(ダンパー)を組み込んだ1質点系RC造建物の弾塑性応答性状

前章では、1質点系RC造建物の弾塑性応答性状が、「エネルギー入力」と「エネルギー吸収(消費)」の関係から評価可能であることを示した。つまり、建物は入力されたエネルギーに対して、それに釣り合う(等しい)エネルギーを消費するために、塑性化(損傷)することによって地震外乱に抵抗していると言える。この知見に基づき、RC造建物の耐震性能を向上させる一つの方法として、建物にエネルギー吸収部材(ダンパー)を組み込んだ場合を想定し、その建物特性について検討した。すなわち本章の検討では、エネルギー吸収性能が明瞭なダンパーが入力エネルギーを消費することによって、柱や梁もしくは壁などの主体構造の損傷を低減し、RC造建物の耐震性能を向上させることを意図している。ダンパーを組み込んだ建物の概念を図10に示す。

### 3.1 解析諸元

解析モデルは、前章と同様に1質点系モデルとする。ダンパーを組み込んだ建物の解析は、武田モデルの履歴特性を有する主体構造のバネと、バイリニア型の履歴特性を有するダンパーのバネが並列に結合された1質点並列系の解析モデルを用いる。解析モデルおよび解析諸元を図11に示す。ダンパーを組み込んでいない主体構造のみの建物をmodel1、主体構造にダンパーを組み込んだ建物をmodel2とする。主体構造の降伏耐力はともに0.3Wとし、弾性固有振動数を0.5Hz, 1.0Hz, 2.0Hz, 4.0Hzに設定した。ここでは、ダンパーの降伏耐力とダンパーと主体構造の剛性比を主な解析変数として選び、これらの変数が主体構造の消費エネルギーおよび最大塑性率に及ぼす影響について調べた。ダンパーの降伏耐力は0.05W, 0.1W, 0.2W, 0.3W, 0.4W、ダンパーと主体構造の剛性比は0.0~4.72までを7分割とした。入力地震波は、EL Centro<NS>の最大速度を500mm/secに基準化して用いた。弾塑性系の減衰はここでも非減衰として扱った。

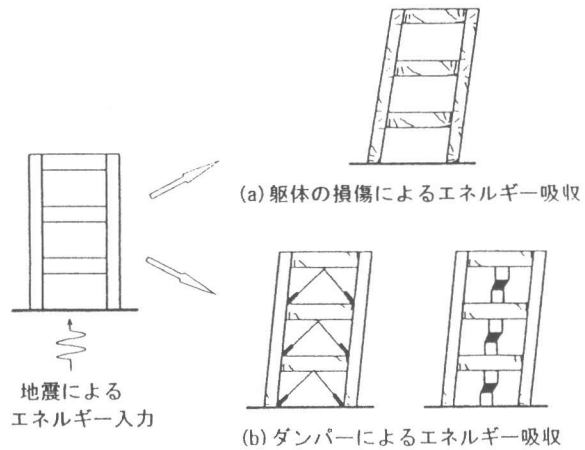


図10. 概念図

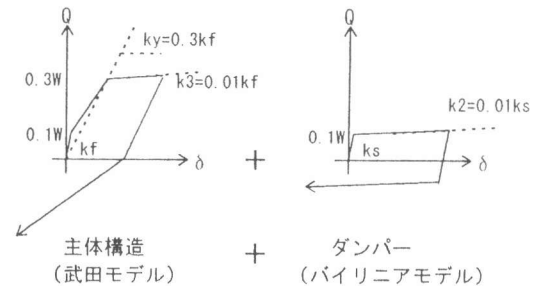
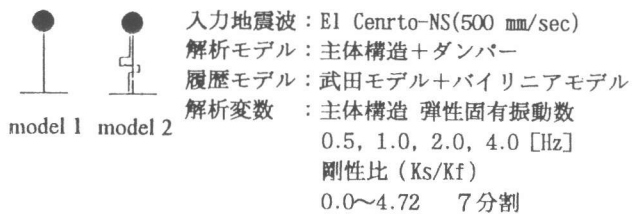


図11. 解析モデル

### 3.2 解析結果

model1の解析とダンパーの降伏耐力を0.1Wとしたときのmodel2の解析で得られた総エネルギー入力、主体構造消費エネルギー、ダンパー消費エネルギーおよび最大応答変位を図12、図13、図14、図15示す。解析結果は、各並列モデルの弾性固有振動数に対応させてプロットしている。また、各図中の実線は、減衰定数10%の弾性系のエネルギースペクトルである。図13は、ダンパーを組み込むことにより、主体構造の消費したエネルギーがいずれの場合も少なくなることを、そしてダンパーの剛性が増す程その度合いが大きくなることを示している。また、主体構造の消費したエネルギーが少なくなった分、ダンパーの消費したエネルギーが多くなっていることが図14より分かる。最大応答変位も、ダンパーを組み込むことによりmodel1より小さくなっている(図15参照)。主体構造の塑性率と剛性比の関係をダンパーの降伏耐力ごと図16に示す。主体構造の塑性率は、ダンパーの降伏耐力を上げるにより小さく押さえることができ、ダンパーの剛性は主体構造の剛性の半分程度あればその効果が見られることを示している。

以上、数少ないケーススタディーではあるが、ダンパーをRC造建物に組み込むことにより、柱や梁もしくは壁などの主体構造の損傷を低減でき、RC造建物の耐震性能を向上させることが可能であることを示した。

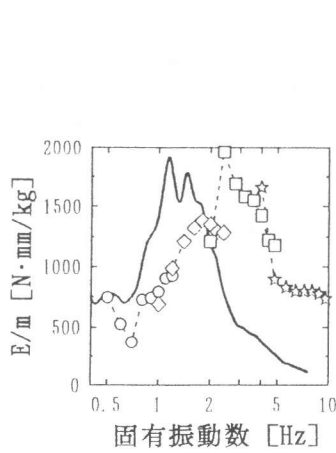


図12. 総エネルギー入力  
換算速度

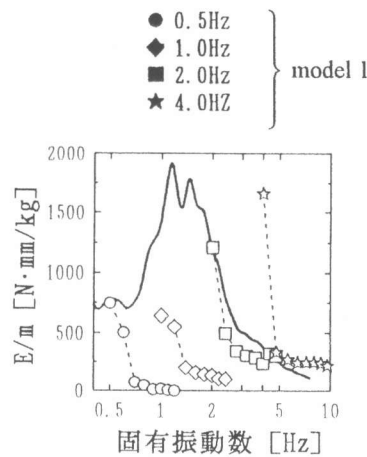


図13. 主体構造消費  
エネルギー

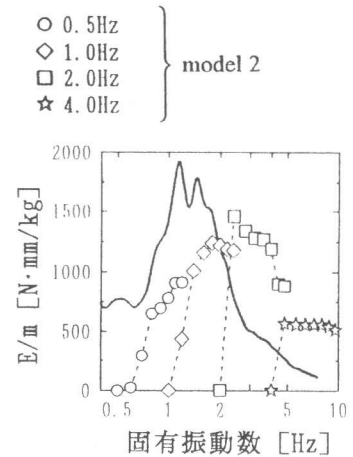


図14. ダンパー消費  
エネルギー

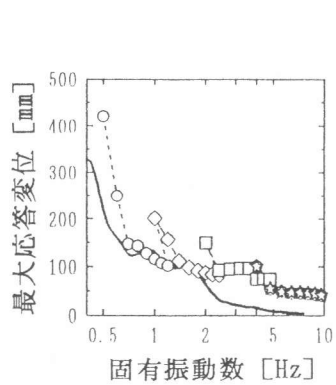


図15. 最大応答変位

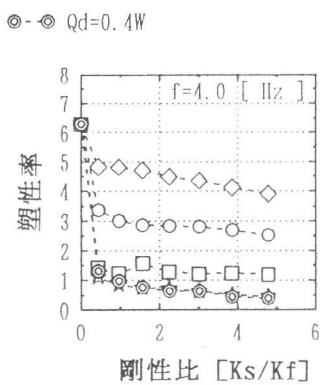
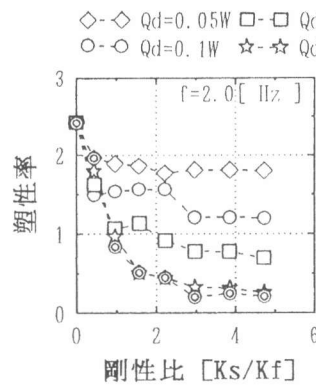


図16. 塑性率と剛性比の関係

#### 4. まとめ

以上の検討結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) 非減衰弾塑性系の応答値（最大応答変位と総エネルギー入力）は、復元力特性の形態や入力地震波特性、さらには建物の固有振動数に依存せずに、総エネルギー入力が等価な弾性系の応答値（弾性応答スペクトル）で評価できる。
- 2) RC造建物の弾塑性応答性状についても、地震により入力されるエネルギーに対して建物が消費する、もしくは、応答するというエネルギー論的な評価が可能であり、これは、S造またはRC造という構造種別には依存しない基本的な評価手法といえる。
- 3) エネルギー吸収性能が明確なダンパーをRC造建物に組み込むことにより、柱や梁もしくは壁などの主体構造の損傷を低減でき、RC造建物の耐震性能を向上させることが可能であることを示した。

#### 参考文献

- [1]秋山宏 「建築物の耐震極限設計」 東京大学出版会、1987年
- [2]北嶋圭二 「2方向入力を受ける鉄筋コンクリート造建物の応答性状に関する研究」 日本大学学位論文、1994年
- [3]北嶋、安達、中西「2方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱の振動台実験」、AIJ構造系論文報告集、No.455、pp137～146、1994.1
- [4]北嶋、安達、中西「2方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱の地震応答解析」、AIJ構造系論文報告集、No.461、pp85～94、1994.7