

# 1 自由度系の弾塑性応答における 強震動の種類の影響

松村 和雄\* 大石 カズ\*\* 中原 浩之\*

## EFFECT OF THE TYPES OF STRONG GROUND MOTIONS ON THE ELASTO-PLASTIC RESPONSE OF A SDOF SYSTEM

Kazuo MATSUMURA , Kazu OHISHI and Hiroyuki NAKAHARA

The effect of the types of strong ground motion on elasto-plastic response of a SDOF structure is examined using three type strong motions; Hachinohe 1968 and Kushiro 1994 as examples of the interplate earthquakes, Kobe 1995 and Miyanojyo 1997 as examples of the near field earthquakes, and El Centro 1940 and Taft 1952 as the standard motions for the seismic design. Hysteresis models of the structure are bilinear and trilinear, the natural periods are 0.1, 0.3 and 0.5 (s) and the ratio of the yield shear forces to the minimum shear force within elastic are from 0.3 to 0.7. The ductility ratio and the total plastic energy do not depend on the types of strong motions, however, the duration during plastic and instantaneous energy depend on the types of strong motions, especially in short natural period.

**Keywords :** strong ground motion, plastic energy, elasto-plastic response, near field earthquake

### 1. はじめに

耐震設計における実地震動を用いた時刻歴応答解析では、どのような地震動を入力するのが最適であるかという基準が明確でない。もし、地震動によって応答特性が違えば異なるタイプの地震動を考慮すべきであるが、同じならば一つの地震動のみを考慮すれば良いことになる。

今まで、地震動のタイプとしては、主に、プレート境界で発生する大地震、いわゆる海洋性地震、によるものと、直下地震によるものの2つが考えられてき

た。前者の地震動は強震部分の継続時間が長く、後者の地震動は非常に強いがその継続時間は短いという特徴があり、前者の地震動を受けた場合は建物は損傷が累積して崩壊に至り、後者の場合は瞬間的に崩壊すると考えられる。

本研究では、3タイプの6地震動を用いて、弾塑性復元力モデルをもつ1自由度系の時刻歴応答解析を行い、地震動の種類による建物の応答の違いを明らかにする。

### 2. 入力地震動と解析モデル

解析に用いた6つの地震動を図1に示す。海洋性地震による地震動として Hachinohe(1968年, EW成分, PGA=183gal)、Kushiro(1994年, EW成分, PGA=473gal)、直下地震による記録として Kobe(1995年, NS成分, PGA=

2000年7月15日受理

\* 建築学科

\*\* 博士前期課程建築学専攻

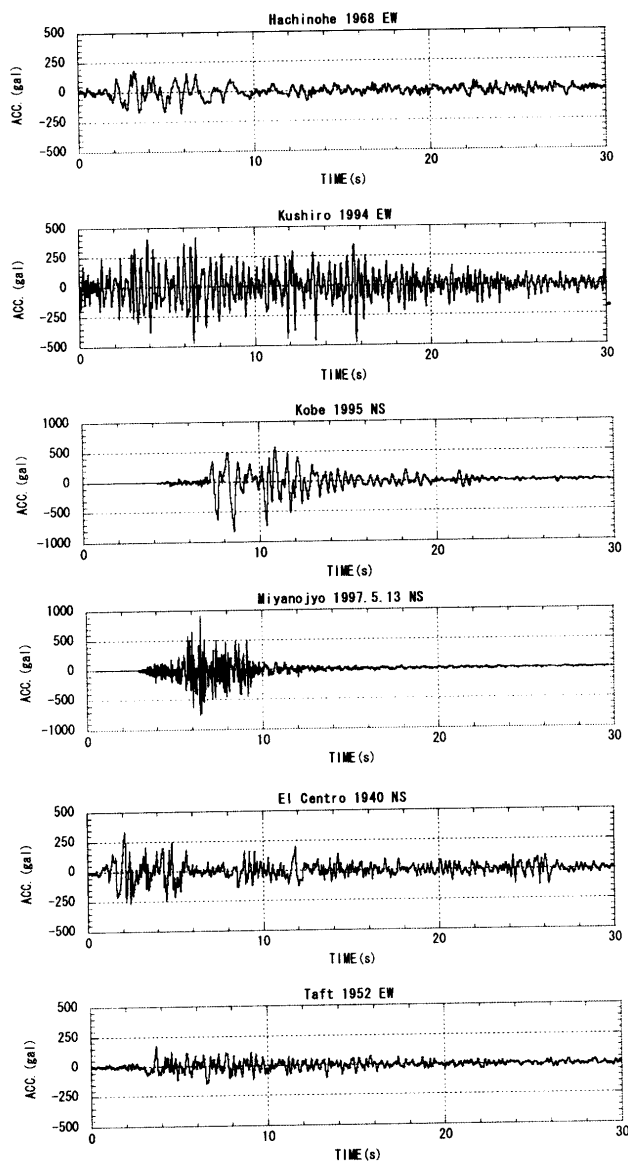


図1 解析に用いた地震動

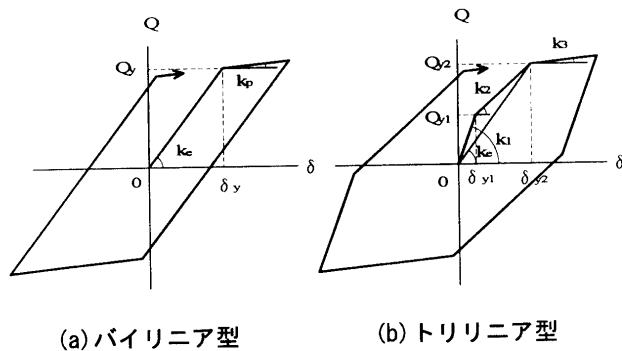


図2 復元力特性

818gal)、Miyanojyo(1997年5月13日, NS成分, PGA=903gal)を用いた。また、比較のために耐震設計で多く用いられるEl Centro(1940年, NS成分, PGA=342gal)とTaft(1952年, EW成分, PGA=176gal)についても解析した。ここに、PGAは最大加速度を表す。

KobeとMiyanojyoは非常に大きな最大加速度を持ち、継続時間は短い。一方、HachinoheとKushiroは継続時間が長く、直下地震によるものと明らかに異なる波形を示している。El CentroとTaftはこれらの中間的な性状を示している。

建物モデルは1自由度系とし、復元力特性は図2に示すバイリニア型とトリリニア型とした。図中の $K_e$ 、 $K_1$ は初期剛性で、 $K_1=2K_e$ とした。 $K_p$ 、 $K_2$ は2次剛性、 $K_3$ は3次剛性で、 $K_p/K_e$ 、 $K_3/K_e$ は0.05とした。減衰定数は $h=0.05$ で一定とした。

ここでは、降伏せん断力を $Q_{y2}=Q_y$ 、降伏変位を $\delta_{y2}=\delta_y$ と設定した。従って、定常状態ではトリリニア型の履歴吸収エネルギーが大きい。

時刻歴応答解析はNewmarkの $\beta$ 法を用い、 $\beta=1/4$ 、時間刻みは0.001(s)、解析時間は30(s)とした。

### 3. 塑性エネルギーの時間的変化

#### 3.1 エネルギー応答

地動を受ける1自由度系の運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = -m\ddot{y}_0(t) \quad (1)$$

ここで、 $m$ は質点の質量、 $k$ は剛性、 $c$ は粘性減衰係数、 $y(t)$ は質点の相対変位、 $\ddot{y}_0(t)$ は地動加速度である。(1)式に微小変形 $dy(t) = \dot{y}(t)dt$ を乗じて継続時間 $t_0$ まで積分すると、エネルギーのつりあい式(2)が得られる。

$$\int_0^{t_0} m\ddot{y}(t)\dot{y}(t)dt + \int_0^{t_0} c\dot{y}(t)\dot{y}(t)dt + \int_0^{t_0} ky(t)\dot{y}(t)dt = -\int_0^{t_0} m\ddot{y}_0(t)\dot{y}(t)dt \quad (2)$$

左辺第1項は地震終了時の運動エネルギー $E_v$ 、第2項は粘性減衰による消費エネルギー $E_H$ で、第3項は弾塑性バネに蓄えられる塑性歪エネルギー $E_p$ と地震終了時の弾性歪エネルギー $E_E$ の和に分解できる。右辺は地震入力エネルギー $E_I$ である。

#### 3.2 塑性率と累積塑性変形倍率

バイリニア型の場合について、最大変位と降伏変位の比である塑性率 $\mu$ とせん断力比 $Q_y/Q_{\mu 1}$ の関係を図

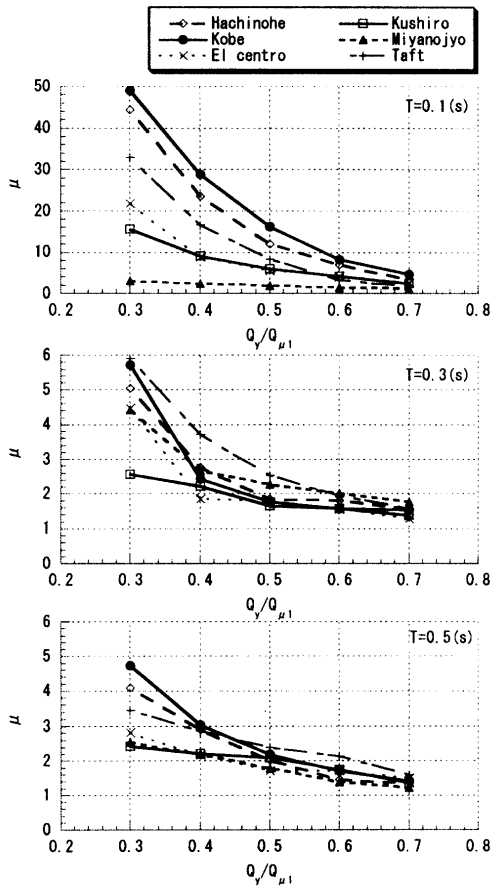


図3.1 バイリニア型の $\mu$ と $Q_y/Q_{\mu=1}$ の関係

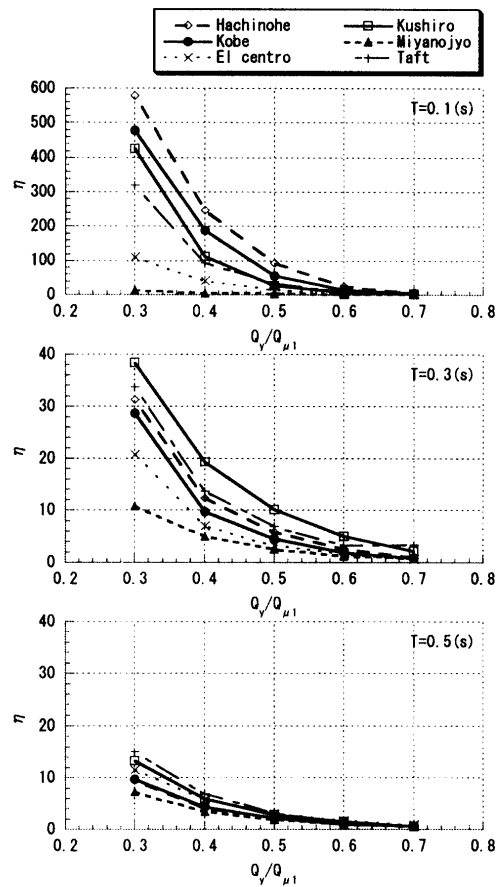


図3.2 バイリニア型の $\eta$ と $Q_y/Q_{\mu=1}$ の関係

3.1に、累積塑性歪エネルギー $E_p$ を降伏せん断力と降伏変位で除した累積塑性変形倍率 $\eta$ と $Q_y/Q_{\mu=1}$ の関係を図3.2に示す。ここで、 $Q_y$ は降伏せん断力、 $Q_{\mu=1}$ は時刻歴応答解析で得られる最大変位が塑性率 $\mu=1$ になるときの降伏せん断力である。

トリリニア型については、ここには示していないが、バイリニア型と比較すると、 $\mu$ は1割程度小さく、 $\eta$ は2割程度大きい、ほぼ同じ傾向を示している。

$\mu$ 、 $\eta$ は $Q_y$ が小さい程地震動による差が大きくなる傾向がある。また固有周期 $T$ が0.1(s)では地震動による差が大きく、0.5(s)と長くなると、差が小さくなる傾向がある。 $T=0.3(s)$ では、 $\mu$ は地震動のタイプによる差が明瞭でないが、 $\eta$ についてはHachinohe、KushiroがKobe、Miyanojyoより大きな値を示し、タイプによる差が見られる。

大局的に見ると、 $T$ が0.3、0.5(s)で $Q_y/Q_{\mu=1}$ が0.4以上では、地震動の種類の違いは明瞭でない。

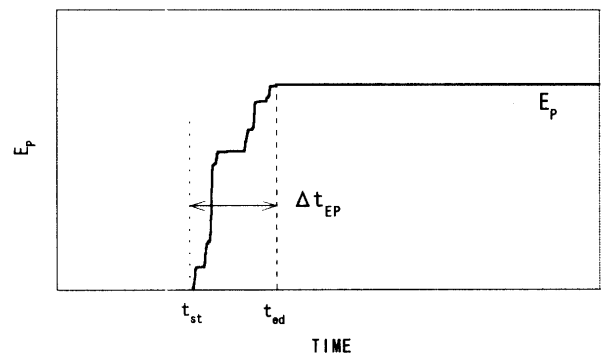
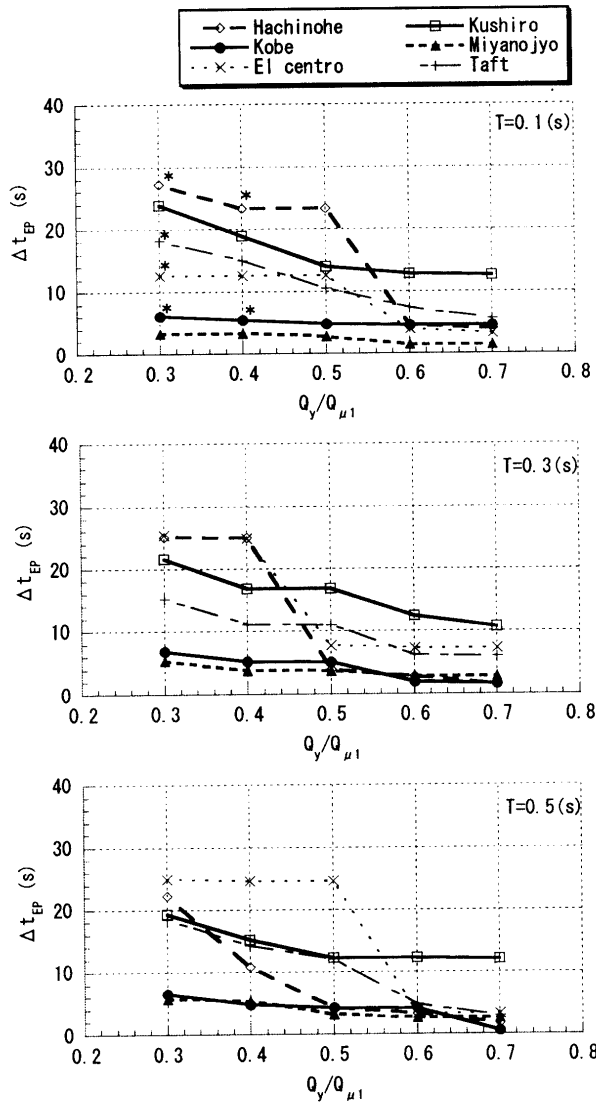


図3.3 塑性変形継続時間 $\Delta t_{EP}$

### 3.3 塑性変形の継続時間

塑性歪エネルギー $E_p$ の時間的な変化の模式図を図3.3に示す。 $t_{st}$ は建物の応答変位の塑性化が始まった時刻で、 $t_{ed}$ は塑性化が終わった時刻を示している。 $t_{st}$ から $t_{ed}$ までの時間を塑性変形継続時間 $\Delta t_{EP}$ と定義する。



\*は塑性率  $\mu \geq 20$  の場合である

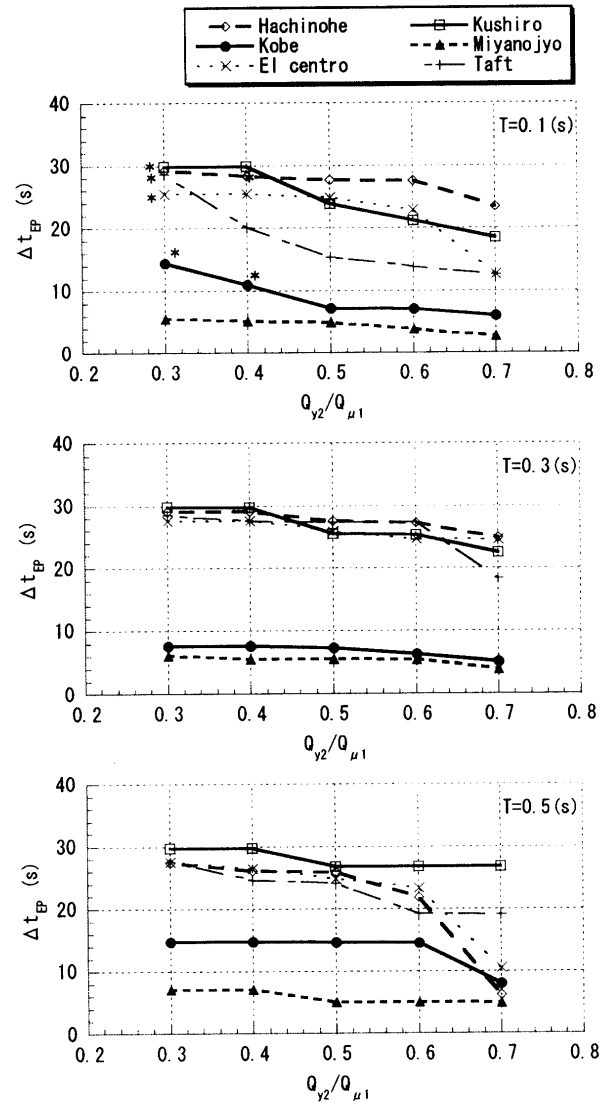
図 3.4 バイリニア型の  $\Delta t_{EP}$  と  $Q_y/Q_{\mu 1}$  の関係

復元力特性をバイリニア型とした場合の  $\Delta t_{EP}$  と  $Q_y/Q_{\mu 1}$  との関係を図 3.4 に示す。

Kobe と Miyanojyo は  $T$ 、 $Q_y$  に拘わらず  $\Delta t_{EP}$  が 10 (s) 以下と短い。Hachinohe と Kushiro は  $Q_y/Q_{\mu 1}$  が 0.3、0.4 と小さいと  $\Delta t_{EP}$  は約 20 (s) で、Kobe と Miyanojyo の約 3 倍大きな値を示すが、 $Q_y/Q_{\mu 1}$  が 0.5 以上になるとほぼ同じ値になる。

また、 $T$  が小さい程地震動のタイプによる  $\Delta t_{EP}$  の違いは明瞭となる。

復元力特性をトリリニア型とした場合の  $\Delta t_{EP}$  と  $Q_{y2}/Q_{\mu 1}$  との関係を図 3.5 に示す。



\*は塑性率  $\mu \geq 20$  の場合である

図 3.5 トリリニア型の  $\Delta t_{EP}$  と  $Q_{y2}/Q_{\mu 1}$  の関係

図 3.4 のバイリニア型と比較すると、Hachinohe と Kushiro でもせん断力比  $Q_{y2}/Q_{\mu 1}$  による差が小さい点が違っている。

Hachinohe と Kushiro は  $\Delta t_{EP}$  が 20 ~ 30 (s)、Kobe と Miyanojyo は 5 ~ 10 (s) であり、地震動のタイプによる違いが明瞭である。El Centro と Taft は Hachinohe と Kushiro とほぼ同じ性状を示している。

### 3.4 瞬間塑性エネルギー

塑性歪エネルギー  $E_p$  は、構造物の塑性仕事の累積値であり、地震により構造物が受ける損傷の指標と

考えられる<sup>1),2)</sup>が、瞬間入力エネルギーを損傷の指標とする研究<sup>3)~7)</sup>もある。瞬間入力エネルギーの定義は研究者によって異なり、一般には、応答変位が極値から次の極値までの時間、すなわち $E_v = 0$ の時点から、次の $E_v = 0$ の時点までに要する時間での入力エネルギー $E_i$ の増分を瞬間入力エネルギー $\Delta E$ と定義する。

この点を考慮して、評価時間 $\Delta t$ に対する塑性歪エネルギー $E_p$ の増分を瞬間塑性エネルギー $\Delta E$ と定義する。その模式図を図3.6に示す。 $\Delta t$ を固有周期 $T$ と $T/2$ とした2つの場合について求めた。

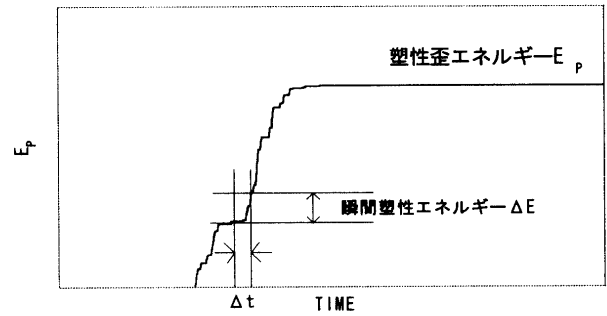


図3.6 瞬間塑性エネルギー $\Delta E$

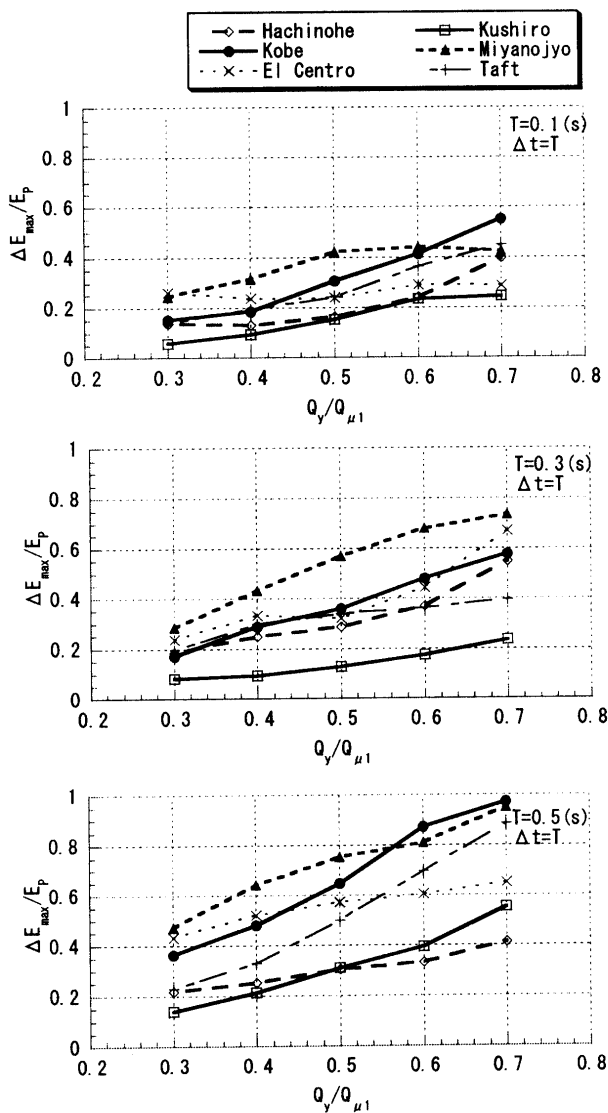


図3.7 バイリニア型の $\Delta E_{\max}/E_p$ と $Q_y/Q_{\mu 1}$ の関係

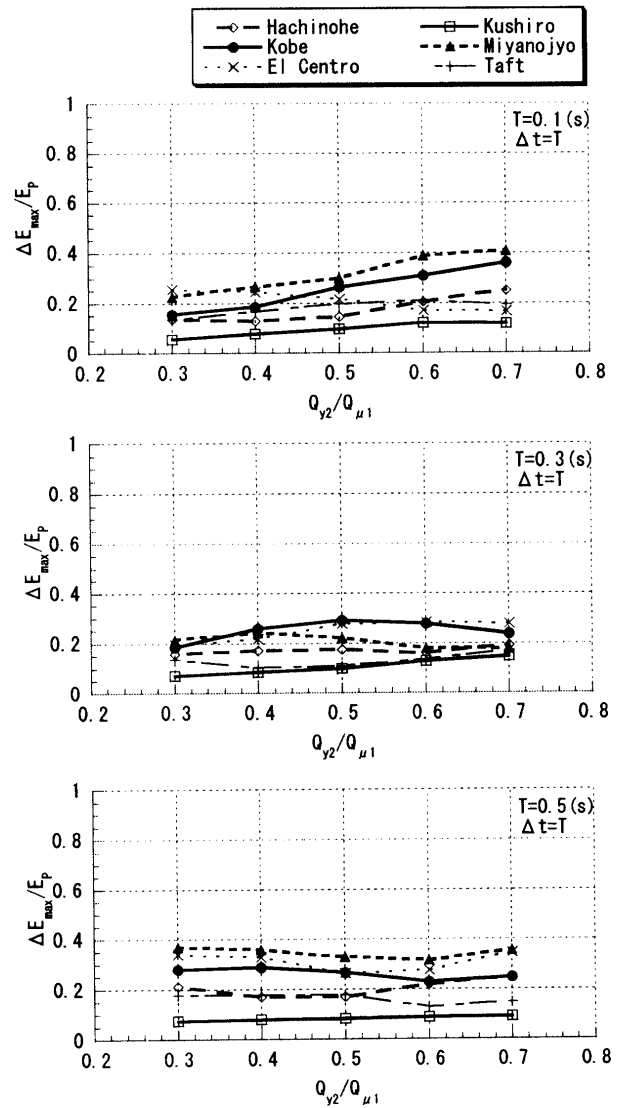


図3.8 トリリニア型の $\Delta E_{\max}/E_p$ と $Q_{y2}/Q_{\mu 1}$ の関係

$\Delta t$ の間に全塑性歪エネルギーの何割が生じたかを見るために、 $\Delta E$ の最大値である最大瞬間塑性エネルギー $\Delta E_{\max}$ と塑性歪エネルギー $E_p$ の比 $\Delta E_{\max}/E_p$ と $Q_y/Q_{\mu 1}$ 、 $Q_{y2}/Q_{\mu 1}$ との関係を調べた。 $\Delta t$ を $T/2$ 、 $T$ とした場合を比較した結果、傾向はほぼ同じであるので、ここでは $\Delta t=T$ の場合のみを示す。

復元力特性をバイリニア型とした場合を図3.7に示す。 $T$ に拘わらず $Q_y/Q_{\mu 1}$ が大きくなると $\Delta E_{\max}/E_p$ が大きくなる。この場合には塑性歪エネルギーはあまり分散せず、建物は瞬間的に破壊すると考えられる。

また、Kushiroは $Q_y/Q_{\mu 1}$ に拘わらず、 $\Delta E_{\max}/E_p$ が最も小さい。この場合には塑性歪エネルギーが分散するため、建物は何回かに分けて破壊が進行すると考えられる。

$T$ が大きい程、地震動のタイプによる違いも大きくなる。 $T$ が0.5(s)では、KobeとMiyanojyoの $\Delta E_{\max}/E_p$ がHachinoheとKushiroより2倍以上大きな値を示しており、より短時間で塑性化していると考えられ、地震動のタイプによる違いが明瞭である。

復元力特性をトリリニア型とした場合を図3.8に示す。図3.7のバイリニア型の場合と比較すると、 $T$ 、 $Q_y/Q_{\mu 1}$ に拘わらず、 $\Delta E_{\max}/E_p$ はほぼ一定で、地震動による差は小さい。

また、Kobe、Miyanojyoの $\Delta E_{\max}/E_p$ はHachinohe、Kushiroより若干大きな値を示す程度で大きな差はなく、地震動のタイプによる違いは明瞭でない。

#### 4. 結論

地震動のタイプの違いが構造物のエネルギー応答量に及ぼす影響を明らかにするため、バイリニア型とトリリニア型の復元力を持つ1自由度系の弾塑性復元力モデルについて3タイプの6つの地震動を用いて時刻歴応答解析を行った。固有周期 $T$ と降伏せん断力 $Q_y$ をパラメータにして、塑性率 $\mu$ と累積塑性変形倍率 $\eta$ の大きさの変化と塑性歪エネルギー $E_p$ の大きさと発生状況の違いを調べた結果、以下の結論が得られた。

- (1)  $\mu$ すなわち最大変位と $\eta$ すなわち塑性歪エネルギーの総量は、地震動のタイプによる違いは明瞭でない。また、これらの値はバイリニア型とトリリニア型による違いは小さく、ほぼ同じ傾向を示す。
- (2) 塑性歪エネルギーの蓄積の始まりから終わりまでの時間 $\Delta t_{ep}$ は地震動のタイプによる違いが明瞭

である。直下地震の地震動では、バイリニア型でもトリリニア型でも $T$ 、 $Q_y$ に拘わらず、この時間はほぼ同じで、短時間で塑性化している。海洋性地震の場合、バイリニア型では $T$ に拘わらず、 $Q_y$ が小さいと直下地震の地震動より約3倍長い時間で塑性化する。 $Q_y$ が大きくなると直下地震の地震動と同じ性状を示し、短時間で塑性化するようになる。トリリニア型では $T$ 、 $Q_y$ に拘わらず、直下地震の地震動より2~3倍長い時間で塑性化する。

- (3) 瞬間的に生じる塑性歪エネルギーの最大値は、バイリニア型では地震動のタイプによる違いが比較的明瞭であるが、トリリニア型ではそれほど明瞭でない。バイリニア型では $T$ 、 $Q_y$ が大きくなるほど、直下地震の地震動は海洋性地震の地震動の2倍以上大きい。トリリニア型では $T$ 、 $Q_y$ に拘わらず、直下地震の地震動が海洋性地震の地震動より若干大きい程度である。

#### 謝辞

本論文の作成にあたり、内田保博助教授に貴重な意見を頂きました。ここに記して感謝します。

#### 参考文献

- 1) 秋山宏：「建築物の耐震極限設計 第2版」，東京大学出版会，1980
- 2) 加藤勉，秋山宏：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷の関係，日本建築学会論文報告集，第235号，pp.9-18，1975.9
- 3) 岩崎智哉，中村孝也，堀則男，井上範夫：擬似応答スペクトルを用いた瞬間入力エネルギーの推定方法，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.2579-2584，1998
- 4) 中村孝也，堀則男，井上範夫：瞬間入力エネルギーによる地震動の破壊特性評価と応答変形の推定，日本建築学会構造系論文集，第513号，pp.65-72，1998.11
- 5) 秋山宏，宮崎光夫：免震構造設計指針 第2版，エネルギー入力増分に着目した応答予測，pp.454-458，日本建築学会，1993.12
- 6) 矢花修一，和泉正哲：地震時のエネルギー授受に着目した非線形応答推定法，第9回日本地震工学シンポジウム，Vol.2，pp.1633-1638，1991.12
- 7) 中村孝也，堀則男，井上範夫：地震動エネルギーの入力過程を考慮した鉄筋コンクリート造建物の応答最大変形推定法，構造工学論文集，Vol.44B，pp.359-368，1998.3