

論文 RC 建造物の地震応答に及ぼす位相角差分布の影響

徳田 文佳^{*1}・小谷 俊介^{*2}

要旨：観測波の擬似速度応答スペクトルと正規分布と仮定して求めた位相角差を合成して模擬地震動を作成する。作成した模擬地震動を用いて強度・履歴モデルの異なる一質点系の弾塑性地震応答解析を行い、要求耐力・履歴・入力エネルギーの違いを調べる。擬似応答速度スペクトルは同じで位相角が異なる地震波による応答において要求耐力は振動系の周期帯によつては最大2.3倍の差異が生じる。また、位相角差の分布のばらつきが大きいと振動系の応答変位が降伏変位を超える回数が多くなる。降伏変位を超える回数が多くなると消費されるエネルギーが多くなり、部材の損傷が大きくなると考えられる。

キーワード：位相角，模擬地震動，弾塑性地震応答解析

1 はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震以降、直下型地震と海洋性地震の特性の相違が、構造物の耐震性に及ぼす影響の違いが問題になった。現時点では、それぞれの地震動の特性が明確にされていないが、本研究では特に地震動の位相特性に注目し、RC建造物の地震応答に与える影響を調べる。本研究では、マグニチュード8程度で、陸地から遠距離のプレート境界またはプレート内で発生した地震動を海洋性地震動と呼ぶ。また、マグニチュードは6~7程度であるが、陸地内の活断層によって浅い震源で発生する地震動を直下型地震動と呼ぶ。設計用地震動の研究は、スペクトル特性について重点がおかれ、位相特性が弾塑性地震応答解析に及ぼす影響についての研究は少ない。また、直下型地震動と海洋性地震動を意識して位相角を取り扱う研究も数が少ない。

本研究では、まず大崎の方法[1]を参考にして、フーリエ振幅スペクトルと位相角より設計用模擬地震動を作成する。位相角は、ランダムな数列を用いて人工的な手法で作成する。応答変位が同程度となる模擬地震動を、擬似速度応答スペクトルを揃えて作成する。次に、作成した模

擬地震動を用いて弾塑性応答解析を行い、周期・強度・履歴モデルによって、要求耐力・塑性回数・エネルギー入力にどのような変化がみられるかを検討する。塑性回数とは、地震応答中に振動系の変位が正側と負側で降伏変位を超える回数の合計と定義する。

2 模擬地震動

2.1 位相角

模擬地震動を作成する準備として、直下型地震動と海洋性地震動の位相角差分布について考察する。地震波を周波数成分毎に分解した時、実際の成分波とのずれを位相角と呼ぶ。また、周波数の大きい成分から順に位相角の差をとり $0 \sim -2\pi$ の間に並べ、一定区間毎の数を集計したものを位相角差分布と呼ぶ。この位相角差分布は加速度の包絡線形状と類似することが分かっている[1]。この性質を利用して模擬地震波を作成する。ここでは、直下型地震動として、シルマーNS(1994年)・神戸海洋気象台NS(1995年)を用い、海洋性地震動としてタフトNS(1952年)・八戸記録(1968年)の加速度記録を用いる。それぞれの地震波のマグニチュード・最大加速度・最大速度を表-1に示す。

*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東京大学大学院工学系研究科 教授 Ph.D.・工博 (正会員)

表-1 地震波のデータ

加速度記録	マグニチュード	最大加速度 cm/s ²	最大速度 cm/s
シルマーNS	6.6	827	130
神戸海洋NS	7.2	818	93
タフトNS	7.7	152	18
八戸EW	7.9	225	43

これらの地震波の位相角差分布・加速度時刻歴・正規分布を重ねて図-1に示す。ただし、横軸・縦軸それぞれの最大を1として規格化している。既往の研究で、位相角差分布と加速度時刻歴の包絡線形状の類似性が示されているが、直下型地震では早い時期に大きな成分が発生していることが分かる[2]。また、位相角差分布は正規分布によって近似することができる。シルマーNS・神戸海洋NSのような直下型地震動は標準偏差がそれぞれ0.07, 0.09と小さい。逆にタフトNS・八戸EWのような海洋性地震動は、標準偏差がそれぞれ0.20, 0.19と大きな値となる。4つの地震波の直角2方向も含めたデータから同じように正規分布を求めた標準偏差を

表-2に示す。やはり直下型地震動と海洋性地震動では、標準偏差に違いが見られる。位相角差分布が正規分布に近似できる特性はフーリエ振幅スペクトルによって左右されるため、他の地震波に必ずしも適応できるわけではないことに注意が必要である。

本研究では位相角差分布を正規分布とし、乱数を発生させて位相角を求める。継続時間が十分に長ければ、正規分布の平均値は模擬地震動の特性に影響を与えない。そのため、全ての正規分布において平均値を $0.4 \times 2\pi$ とする。標準偏差は、 $0.02 \times 2\pi$, $0.06 \times 2\pi$, $0.10 \times 2\pi$, $0.20 \times 2\pi$ の4種類とする。正規分布を横軸が等間隔になるように分割し、区間 $[0 \sim \theta]$ までの積分値を区間 $[0 \sim 2\pi]$ での積分値で除し、累積確率密度関数を求める。次に0~1までの乱数を発生させ累積確率密度関数の縦軸とする。その縦軸に対応する横軸の値が位相角差となる。その位相角差を次々に足しあわせていったものを位相角とする。図-2に正規分布と累積確率密度関数を示す。

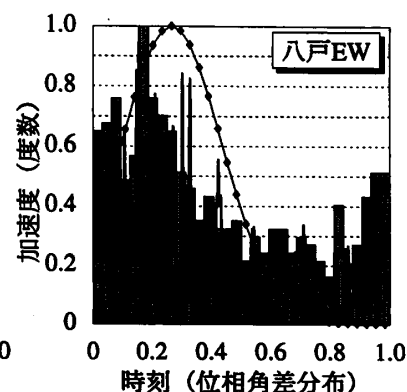
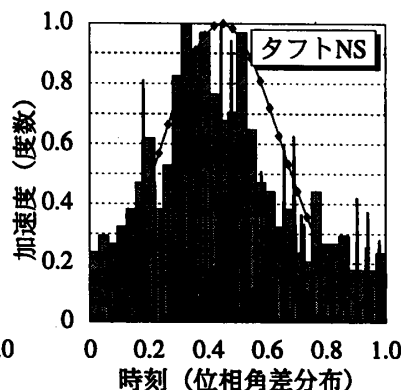
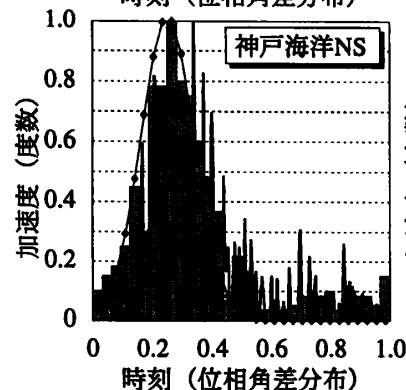
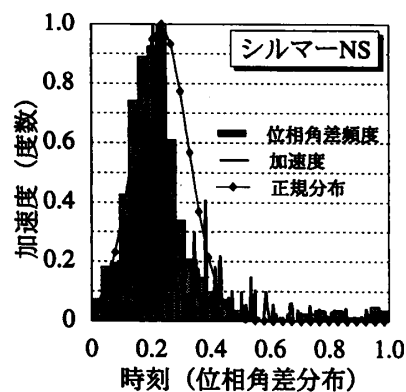


図-1 位相角差分布・加速度・正規分布

表-2 各地震波の標準偏差

	シルマー	神戸海洋	タフト	八戸
NS	0.08	0.09	0.20	0.21
EW	0.08	0.11	0.17	0.16

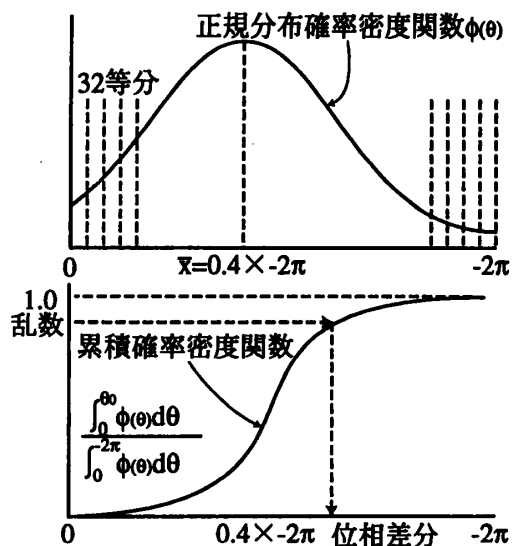


図-2 正規分布による位相角の作成

2.2 目標スペクトル

目標とするスペクトルは、減衰5%の神戸海洋NSと八戸EWの擬似速度応答スペクトルとする。ただし、八戸EWは、最大速度が50cm/sとなるように規準化した後に擬似速度応答スペクトルを求める。作成する模擬地震動の擬似速度応答スペクトルと目標スペクトルとの誤差は二乗平均で5%以内となるようにする。

2.3 模擬地震動の作成

本研究では、フーリエ位相特性を考慮しやすい位相差分法[1][3]を用いて模擬地震動の作成を行う。まず、2.1、2.2の方法で求めた位相角とフーリエ振幅より、複素フーリエ係数を求める。フーリエ振幅スペクトルは減衰が0%の擬似速度応答スペクトルとする。継続時間は目標とするスペクトルを求めた観測波のマグニチュードより、久田式[4]を用いて計算する。

$$C_k = \frac{F_k}{T_d} (\cos \phi_k + i \sin \phi_k) \quad (1)$$

C_k : 複素フーリエ係数

F_k : フーリエ振幅スペクトル

T_d : 継続時間

ϕ_k : 位相角

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (2)$$

M : マグニチュード

ここで、求められた複素フーリエ係数をフー

リエ逆変換して、加速度時刻歴を求める。しかし、ここで求められる加速度時刻歴は、目標とする擬似速度応答スペクトルを示さない。そこで、目標とする擬似速度応答スペクトルを示すよう収束計算を行う。計算の手順を図-3に示す。

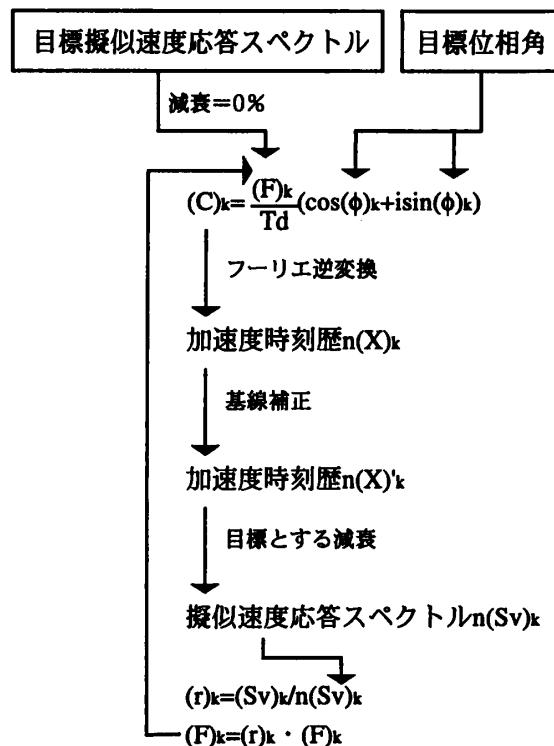


図-3 模擬地震動の作成フロー

模擬地震動の名前とスペクトル・位相角の組合せを表-3に示す。名前の前半が目標とするスペクトルを求めた観測波を示し、後半が位相角差分布の標準偏差を示す。また、模擬地震動の加速度時刻歴を図-4に示す。位相角の違いによって加速度時刻歴に違いが生じていることがわかる。図の右下の数値は各地震波の最大加速度を表す。神戸海洋NSと八戸EWの擬似速度応答スペクトルを図-5に示す。

表-3 使用する模擬地震動

	標準偏差			
	0.02×-2π	0.06×-2π	0.10×-2π	0.20×-2π
海洋NS	Kai-0.02	Kai-0.06	Kai-0.10	Kai-0.20
八戸EW	Hachi-0.02	Hachi-0.06	Hachi-0.10	Hachi-0.20

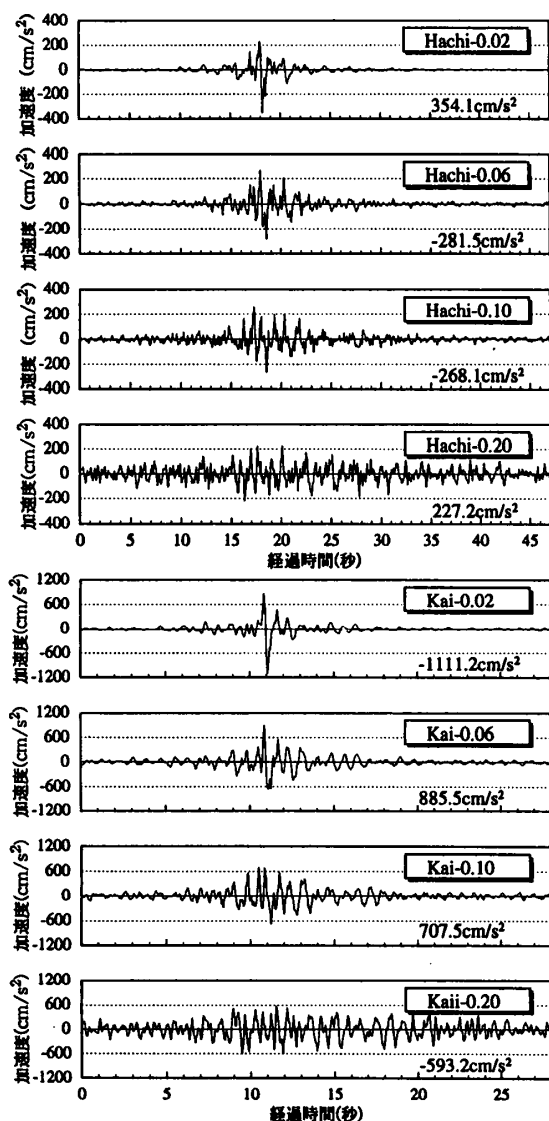


図-4 模擬地震動加速度時刻歴

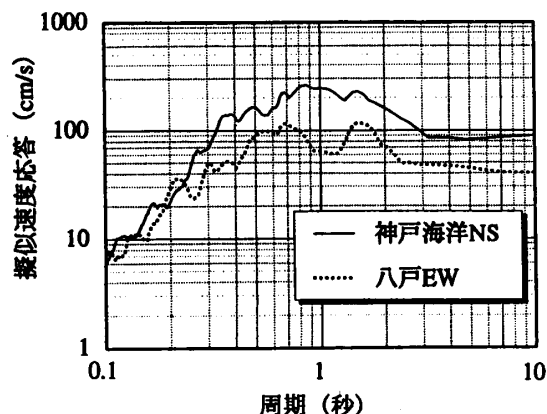


図-5 擬似速度応答スペクトル

3 一質点系弾塑性応答解析

3.1 振動系

振動系は減衰が瞬間剛性比例型で5%の一質点系である。質量は1tonとし、弾性固有周期は

0.2～1.6秒の間を0.01秒刻みで計算する。要求耐力の計算において許容塑性率は4及び2とする。許容塑性率が4の振動系では履歴モデルをタケダモデル[5]とタケダスリップモデル[6]とし、2の振動系では原点指向型モデル[7]とする。タケダモデルとタケダスリップモデルのエネルギー消費の差を大きくするためにタケダスリップモデルの除荷剛性を変えて解析を行う。許容塑性率を4とした時は靱性能のある建物をモデル化し、2とした時は靱性能の無い建物をモデル化している。履歴モデルのスケルトンカーブを図-6に示す。弾性剛性(K_0)は弾性周期によって決定し、降伏点剛性は弾性剛性の0.3倍、降伏後の剛性は弾性剛性の0.01倍とする。また、ひび割れ強度は降伏強度の1/3倍とする。

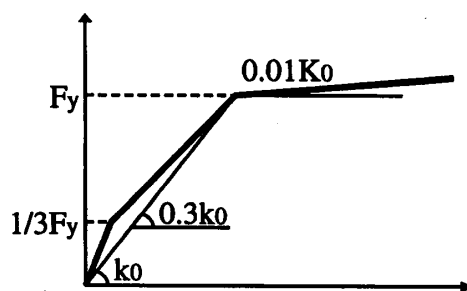


図-6 スケルトンカーブ

3.2 要求耐力スペクトル

目標スペクトルを神戸海洋NSとして作成した模擬地震動の要求耐力スペクトルを図-7に示す。各振動系で要求耐力の最大値と最小値の倍率の最も大きくなる周期と倍率を図中に示す。

周期帯によっては大小関係が入り替わるが、標準偏差の小さな位相角差分布により求めた位相角を有する地震波の方が要求耐力が大きくなる。この傾向はエネルギー吸収能が小さなモデルを使用するほど不明確になる。

3.3 応答特性

地震動入力時の荷重-変形関係の例を図-8に示す。弾性固有周期が0.3秒の振動系で、履歴モデルをタケダモデルとするときには降伏点強度を0.3、タケダスリップモデルとするときに

は降伏点強度を0.4とした場合である。模擬地震動の位相角差分布の標準偏差は $0.06 \times 2\pi$ と $0.20 \times 2\pi$ である。標準偏差の違いによって最大塑性率の違いも見られるが、それ以上に応答変位が降伏変位を超える回数が顕著に異なることが分かる。図中の数値は、応答変位が降伏変位を正側と負側で超える回数の合計を示す。残留変形が大きくなると、残留変形が降伏変位を超えることがあるのでそれ以降の回数は数えないこととする。図-9に各周期で応答変位が降伏変位を超える回数のスペクトルを示す。全ての周期帯で正規分布の標準偏差が0.02の地震波の方が0.06の地震波より回数が多くなっている。RC造建物においては、最大塑性率が問題とされるが、応答変位が繰り返し降伏点を超えることで損傷が進むことが考えられる。

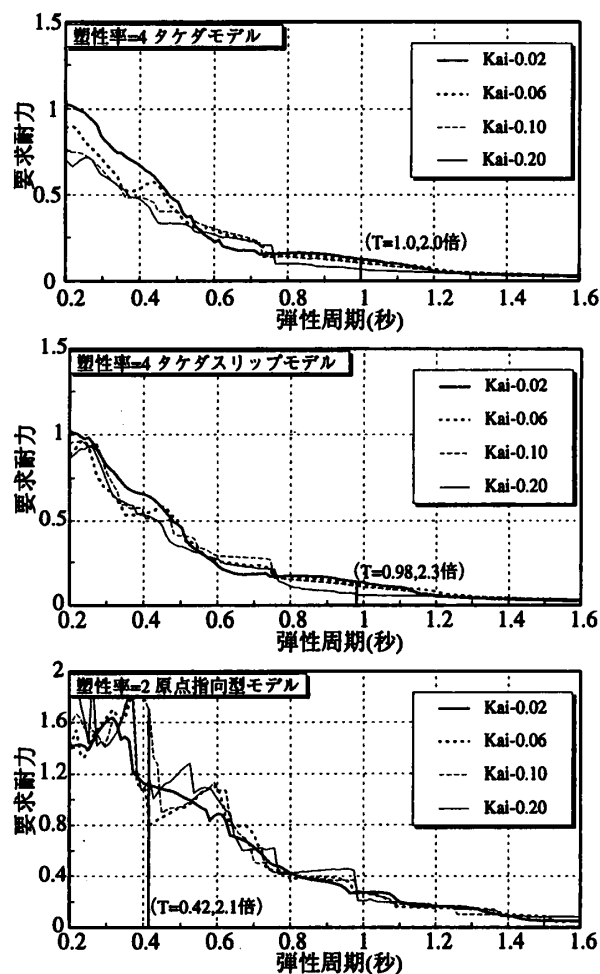
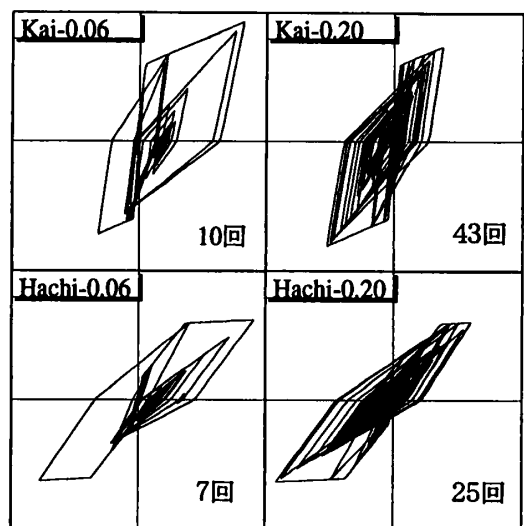
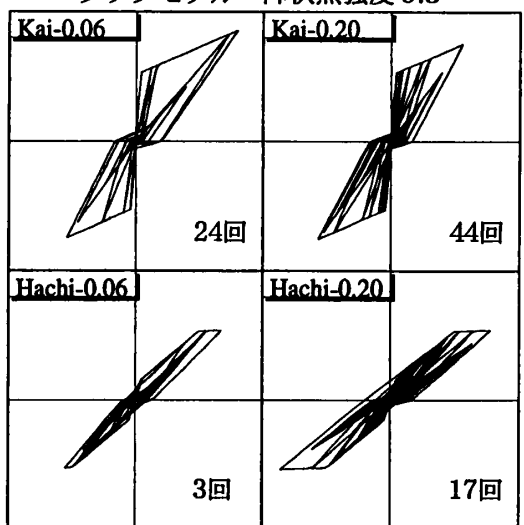


図-7 要求耐カスペクトル



タケダモデル 降伏点強度 0.3



タケダスリップモデル 降伏点強度 0.4

図-8 荷重-変形関係

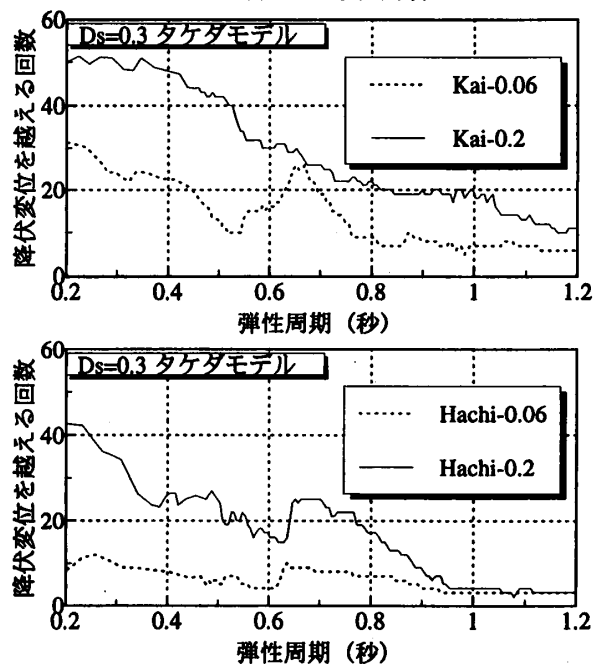


図-9 降伏変位を超える回数

3.4 入力エネルギーと履歴エネルギー

次に各地震波による系への総エネルギー入力について検討する。振動系と入力地震動は3.3と同じ条件で解析を行い、以下の式により総エネルギー入力を計算する。各系に入力される総エネルギーと履歴によって消費されるエネルギーを図-10に示す。

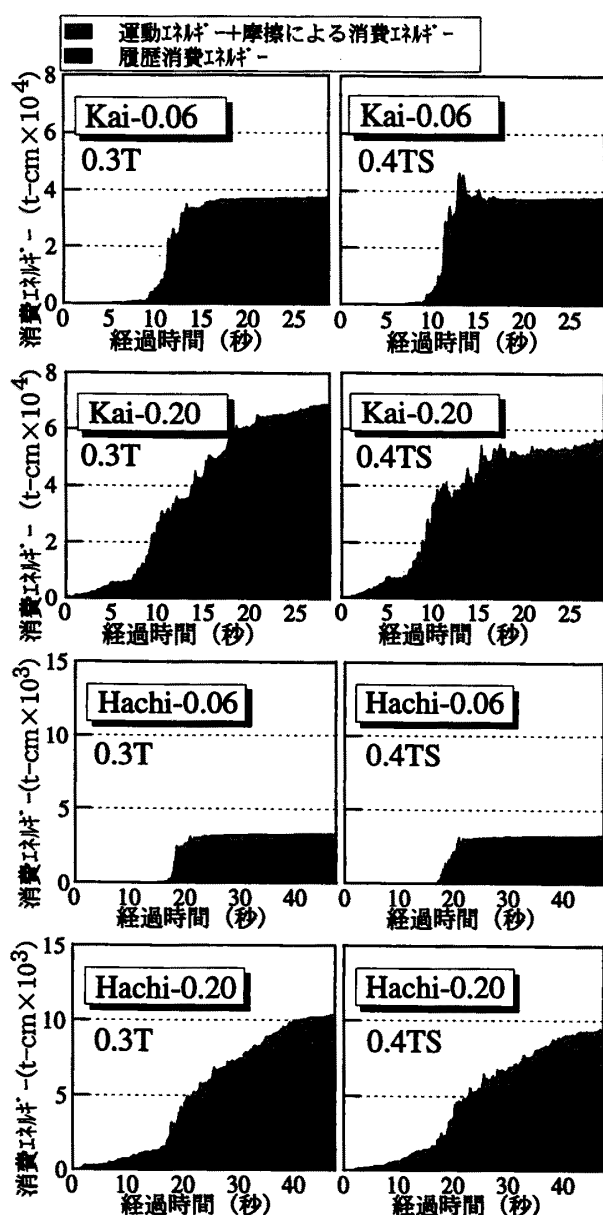
$$E = - \int_0^{T_d} M \ddot{z}_0 \dot{y} dt \quad (6)$$

E : 総エネルギー入力

M : 質量の質量

$\ddot{z}_0$: 地動加速度

$\dot{y}$: 質点の相対速度



0.3T: $F_y=0.3$ タケダモデル 0.4TS: $F_y=0.4$ タケダスリップモデル

図-10 入力エネルギー

本研究では応答変位を揃えるために、疑似速度応答スペクトルを揃えて地震波を作成する。そのため、位相角の違いにより総エネルギー入力には大きな違いが生じた。このことは、3.3で述べたように位相角の異なる地震波では、応答変位が降伏変位を超える回数が大きく異なることから予想される。

4 まとめ

疑似速度応答スペクトルが同じ地震波でも位相角が異なることで、要求耐力で最大2.0~2.3倍の違いが生じた。しかし、どの周期帯でどの程度の差異が生じるのかを定量的に判断することは難しい。また、ほぼ同程度の最大塑性率を示す場合でも、応答変位が降伏変位を超える回数は位相角差分布の標準偏差が大きいほど多くなる。それに伴い、総エネルギー入力量も多くなる。そのため、総エネルギー入力量は地震波の位相角に大きく影響されると考えられる。

参考文献

- [1] 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994
- [2] 大川出：地震動の位相特性とその応用，学位論文，1980
- [3] 桑村仁ら：地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率，日本建築学会構造系論文集，1997.1
- [4] 太田外気晴ら：模擬地震波作成のための地震動の最大速度と最大加速度の関係ならびに主要動部の継続時間，鹿島建設技術研究所年報25号，1976
- [5] Takeda, T., Sozen, M. A., and Nielsen, N. N., Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol. 96, ST12, pp. 2557-73, 1970,
- [6] 江戸宏彰他：鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析，日本建築学会学術講演梗概集，P1877-78, 1977
- [7] Hisada, Nakagawa, and Izumi, Earthquake Response of Structures Having Various Restoring Force Characteristics, 地震工学国内シンポジウム講演集, 1962