

論文 粘性ダンパーをもつRC造建物とロッキングを考慮した地盤との2質点系モデルによる地震応答解析

岡田 浩一^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：地震動によって生じる建物と地盤との相互作用が、粘性減衰装置をもつ RC 造建物に及ぼす影響について研究を行った。基礎固定の 1 質点系モデルと、建物と地盤とを 2 質点系に理想化したモデルを地震応答解析し、建物の減衰効果について比較検討した。相互作用を考慮しない場合、建物の変位応答を過小評価する可能性や、粘性ダンパーの応答低減効果を高く評価する可能性、建物に入力される地震動のエネルギーを過大評価する可能性があるという傾向が見られた。

キーワード：動的相互作用、粘性ダンパー、スウェイ・ロッキング、地震応答解析

1. はじめに

建築基準法の改正により、限界耐力計算法が導入され、建物と地盤との動的相互作用を考慮した耐震設計ができるようになった¹⁾。しかし、限界耐力計算法においても地盤は基礎固定が前提であり、地震動の低減効果・建物の応答などは、相互作用の現象の理解がまだ不十分であるために、定量的な把握が難しい。今後、さらに簡易で精確な評価が可能な方法の開発が必要である²⁾。また、剛性の高いコンクリート建築物にも制振装置を取り入れる傾向も見られるようになってきた³⁾。

本研究では、制振装置として粘性ダンパーをもつ建物とスウェイ・ロッキングを考慮した地盤との動的相互作用が地震応答に与える影響を検討した。基礎固定の 1 質点系モデルと、建物と地盤とを簡単な 2 質点系に理想化したモデルにおいて、建物の減衰効果を比較して、検討が必要と思われる点を列挙した。

2. 解析方法

2.1 解析モデル

基礎固定の 1 質点系モデルでロッキングを考慮しないモデル (A モデル)、同じく 1 質点系モ

デルでロッキングを考慮するモデル (B モデル)、相互作用を考慮する建物と地盤の 2 質点系モデル (C モデル) を図-1 に、図の記号の定義を表-1 にそれぞれ示す。

2.2 運動方程式

基礎固定モデル (A モデル) 及び相互作用モデル (B モデル, C モデル) の運動方程式は、以下に示す式となる。

① 基礎固定モデル (A モデル)

$$m_b(\ddot{y}_s + (\ddot{z} + \ddot{y}_g)) + c_s \dot{y}_s + k_s y_s = 0 \quad (1)$$

② 相互作用モデル (B モデル)

$$m_b((\ddot{y}_s + \ddot{\theta} H) + (\ddot{z} + \ddot{y}_g)) + c_s \dot{y}_s + k_s y_s = 0 \quad (2)$$

$$I_b \ddot{\theta} + c_r \dot{\theta} + k_r \theta - c_s \dot{y}_s H - k_s y_s H = 0 \quad (3)$$

③ 相互作用モデル (C モデル)

$$m_b((\ddot{y}_g + \ddot{y}_s + \ddot{\theta} H) + \ddot{z}) + c_s \dot{y}_s + k_s y_s = 0 \quad (4)$$

$$m_g(\ddot{y}_g + \ddot{z}) + c_g \dot{y}_g + k_g y_g - c_s \dot{y}_s - k_s y_s = 0 \quad (5)$$

$$I_b \ddot{\theta} + c_r \dot{\theta} + k_r \theta - c_s \dot{y}_s H - k_s y_s H = 0 \quad (3)$$

*1 東京大学大学院 工学系研究科修士課程 (正会員)

*2 東京大学 助教授 工博 (正会員)

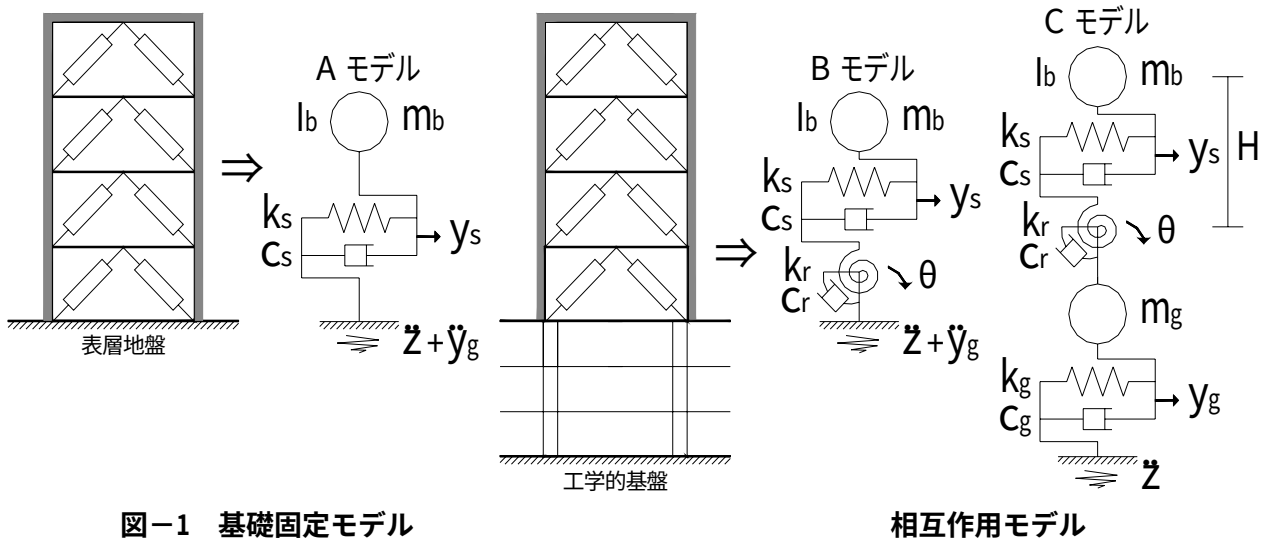


表-1 記号の定義

		質量	固有周期	剛性	減衰係数	高さ	回転慣性	変位	地震動
建物	スウェイ	m_b	T_s	k_s	c_s	H	I_b	y_s	$\ddot{z}$
基礎	ロッキング		T_r	k_r	c_r			θH	
地盤	スウェイ	m_g	T_g	k_g	c_g	—	—	y_g	

2.3 パラメータの設定

① 質量：相互作用モデルにおいて、建物と地盤の質量比 $m_b:m_g$ を決めるにあたり、参考文献 4) より 1:5 と仮定した。

② 固有周期：地盤の固有周期 T_g は、第二種地盤の固有周期 0.6 秒と第三種地盤の固有周期 1.0 秒との間をとり、0.8 秒とした。

建物の固有周期 T_s は、0.05 秒刻みで 0.1 秒から 2.0 秒までとし、基礎の固有周期 T_r を 0.5 秒とした。

③ 高さ：建物の高さ H は、参考文献 5) より $T_s/0.02$ とした。

④ 回転慣性：建物の回転慣性 I_b は $m_b H^2$ とし、地盤の回転慣性は考えないとした。

⑤ 減衰：建物の減衰は、地盤の逸散減衰 ($h_d=0.03$ と仮定) によってのみ生じるとし、内部の減衰定数 h_s は 0 とした。減衰装置を取り付ける場合は、減衰定数 $h_v=0.05, 0.10, 0.20$ とし、3 つの粘性ダンパーを準備した。

地盤の減衰定数 h_g は、自由振動解析により、建物に逸散減衰 ($h_d=0.03$) が生じるように定め

た。また、参考文献 1) よりロッキングの減衰定数 h_r は $0.75h_g$ とした。

地盤の減衰定数 h_g 算定方法を以下に示す。

(1) 基礎固定モデルで、建物の減衰定数を 0.03 ($=h_d$) とし、建物に $1[\text{cm/sec}^2]$ の加速度を 0.01 秒間加え、自由振動させる。

(2) 最大振幅を計算し、包絡線を描く。

(3) 次に、相互作用モデルで、建物の減衰は 0 のままで、地盤の減衰を少しずつ大きくする度に、建物と地盤に $1[\text{cm/sec}^2]$ の加速度を 0.01 秒間加え、自由振動させる。

(4) 基礎固定モデルでの包絡線と相互作用モデルでの自由振動の相対振幅を半周期ごとのピーク点で比べ、5 秒間包絡線に相互作用モデルでの自由振動が 95%以上包絡されるまで(3)を行う。

(5) (4)の条件が満たされた時の減衰を地盤の減衰定数 h_g とする。

この方法により、建物の固有周期 T_s が 0.5 秒、地盤の固有周期 T_g が 0.8 秒の時、質量比 $m_b:m_g$ が 1:5 の地盤の減衰定数 h_g は、0.104 と計算された。この時の振動の様子を図-2 に示す。また、

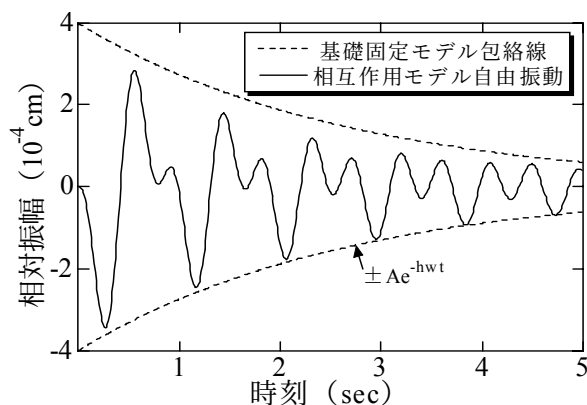


図-2 地盤の減衰決定時の自由振動

地盤の減衰を変えるとパラメータが増え、地震応答の低減効果の検討が困難になる可能性がある。建物の固有周期 T_s が 0.5 秒の時の値を固定して用いた。

2.4 入力地震動

入力地震動は、建築基準法の加速度応答スペクトルに基づいて作成した模擬地震動を用いる。位相特性は一様乱数とし、地盤の増幅特性は考慮していない。模擬地震動の加速度応答スペクトルを図-3に、加速度の時刻歴を図-4にそれぞれ示す。

相互作用モデルでの入力方法は、工学的基盤に模擬地震動をそのまま入力する。一方、基礎固定モデルでの入力方法は、相互作用モデルで得られた地盤の応答加速度と模擬地震動を加えたものを入力する（図-1）。

3. 解析結果

粘性ダンパーの減衰効果の比較のため、建物の水平方向の最大応答変位を用いた。応答低減率を以下に定義する。相互作用モデルでは、地盤に対する建物の相対変位の最大応答値を用いる。この値が大きいくほど、変位応答低減効果があることを意味する。

$$\text{応答低減率} [\%] = 100 \left(1 - \frac{\text{最大応答値}(h\nu)}{\text{最大応答値}(h\nu = 0)} \right)$$

$h\nu$: 粘性ダンパーの減衰定数

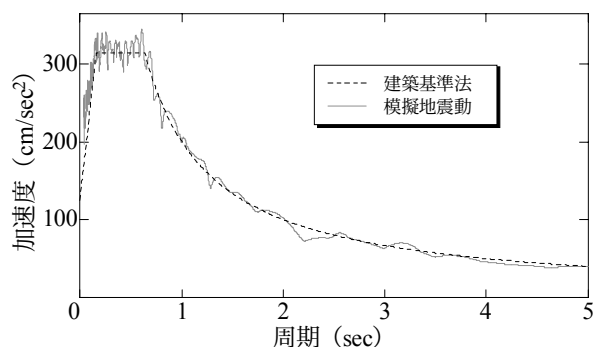


図-3 加速度応答スペクトル

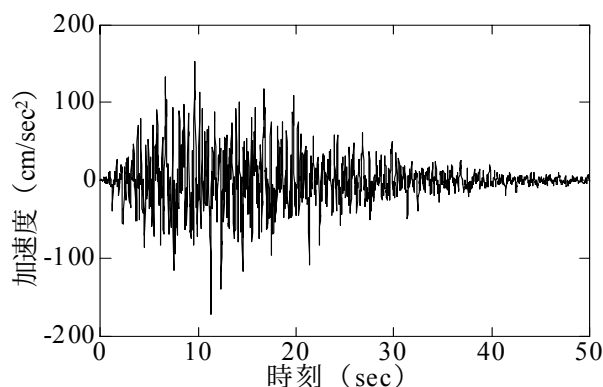


図-4 加速度の時刻歴

3.1 変位応答スペクトル

基礎固定モデル（A モデル）及び相互作用モデル（B モデル、C モデル）で、基礎の固有周期 T_f を 0.5 秒と固定し、建物の固有周期 T_s を 0.05 秒刻みで 0.1 秒から 2.0 秒まで変化させた時の変位応答スペクトルを図-5 に示す。縦の列が y_s （建物のスウェイ）、 θH （基礎のロッキング）、 $y_s + \theta H$ （建物のスウェイ＋基礎のロッキング）の最大応答変位を表し、横の列が粘性ダンパーの減衰定数の違いを表している。図中の A, B, C はそれぞれ A, B, C モデルを省略した。

スウェイの応答変位においては、A モデルの粘性ダンパーがない時、建物の固有周期 T_s が 0.8 秒付近で変位応答が大きくなっているのが分かる。地盤の固有周期 T_g が 0.8 秒であり、ロッキングが考慮されていないため、共振の影響を大きく受けていると考えられる。建物の固有周期 T_s が 1.0 秒以降の長周期になってくると、相互作用を考慮した C モデルの応答変位が大きくなっている。粘性ダンパーの減衰定数が増すにつ

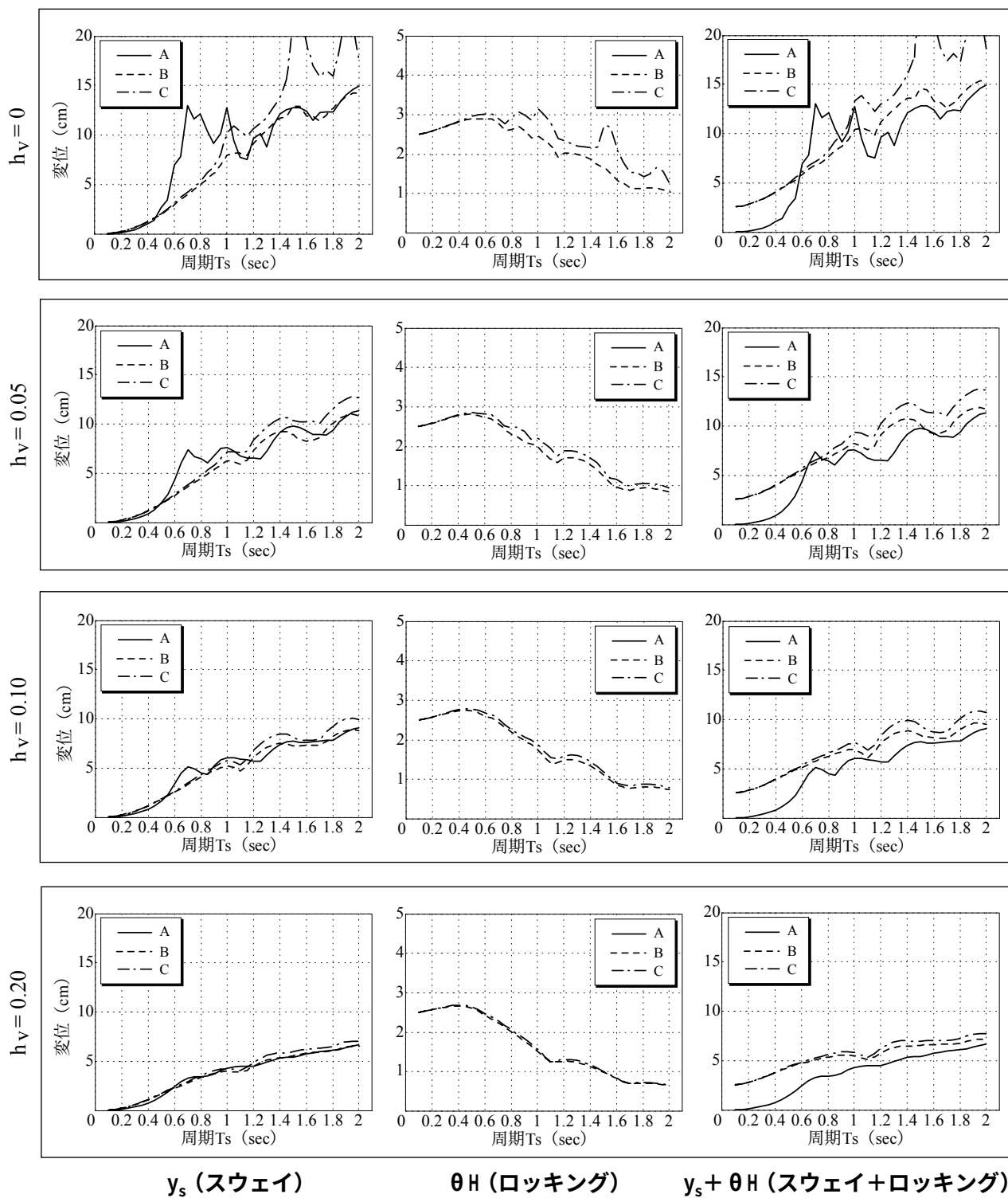


図-5 変位応答スペクトル

れて、すべてのモデルの応答変位に差がなくなり、また、応答変位も小さくなっている。

ロッキングの応答変位においては、建物の固有周期 T_s が 0.6 秒以下では、スウェイの応答変位よりも大きいですが、基礎の固有周期 T_r は 0.5 秒なので、全体的に見ると割合は小さい。粘性ダ

ンパーの減衰定数が増しても応答変位が変わらないのは、回転方向に対しては減衰効果がないことを示している。

スウェイ+ロッキングの応答変位においては、A モデルに対し、B・C モデルはロッキングを考慮しているので、固有周期が伸びている様子が

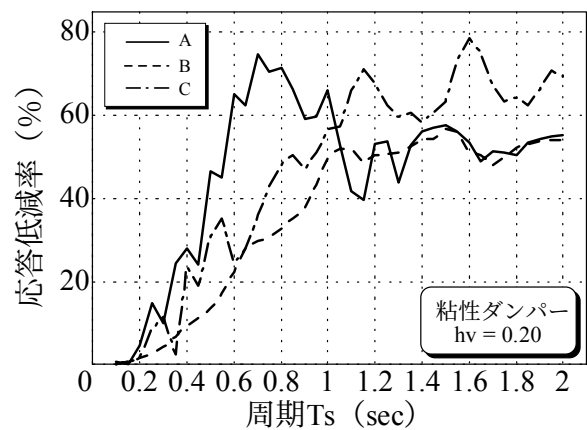
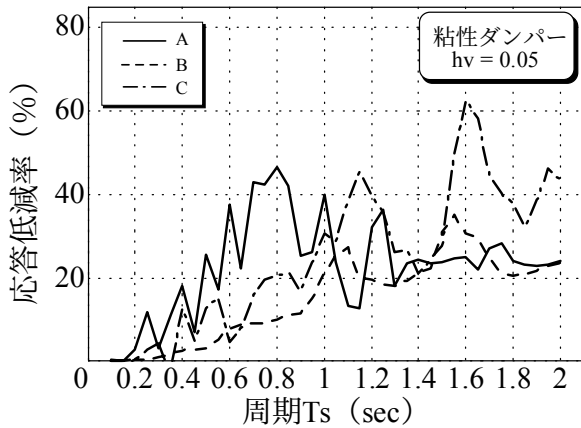


図-6 応答低減率

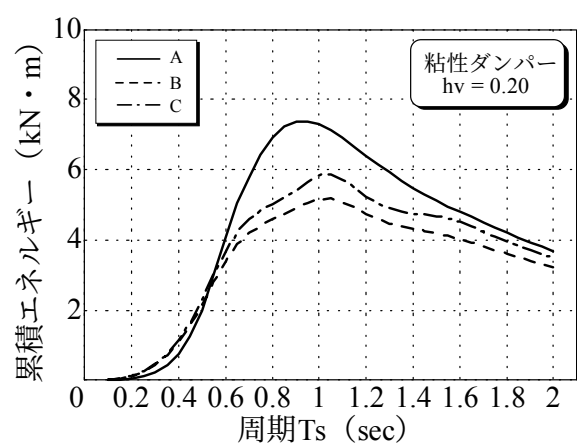
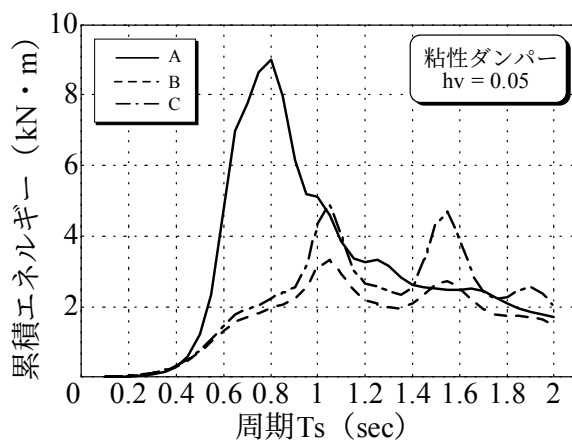


図-7 累積エネルギー

うかがわれる。粘性ダンパーの減衰定数が増すと、各モデルの応答変位の差が小さくなるが、短周期側ではロッキングの影響を受けて A モデルとの差が見られる。

3.2 応答低減率

すべてのモデルで、基礎の固有周期 T_f を 0.5 秒と固定し、建物の固有周期 T_s を 0.05 秒刻みで 0.1 秒から 2.0 秒まで変化させ、粘性ダンパーは $h_v=0.05, 0.20$ の時の応答低減率を図-6 に示す。

建物の固有周期 T_s が 1.0 秒付近を境に、短周期側では、相互作用の C モデルより基礎固定の A モデルの方が低減効果は高くなっている。逆に、長周期側では、基礎固定の A モデルより相互作用の C モデルの方が低減効果は高くなっている。粘性ダンパーの減衰定数が増加すると、応答減衰効果が大きくなっていることが確認できる。B モデルでは、大きな波の変化は見られ

ず、短周期側では C モデルと、長周期側では A モデルと同等の減衰効果となっている。

3.3 累積エネルギー

建物の粘性ダンパーが地震動の間、消費した全エネルギーを累積エネルギーとする。累積エネルギーは、基礎固定モデル及び相互作用モデルの運動方程式に、それぞれの質点における応答速度を乗じ、時間積分して算出する。基礎固定モデルでの累積エネルギーは、地盤の逸散減衰 ($h_d=0.03$) による消費エネルギーを除いたものとなる。

参考文献 6) から、地震が終了し、応答が十分減衰した後では、振動エネルギーは 0 に近づき、地震動の入力エネルギーと減衰力の消費エネルギーは等しくなる。

$$\int_0^t c \dot{y}^2 dt = \int_0^t (-m \ddot{z}) \dot{y} dt \quad (6)$$

$\int_0^t c \dot{y}^2 dt$: 減衰力の消費エネルギー

$\int_0^t (-m \ddot{z}) \dot{y} dt$: 地震動の入力エネルギー

基礎固定モデル及び相互作用モデルで、基礎の固有周期 T_r を 0.5 秒と固定し、建物の固有周期 T_s を 0.05 秒刻みで 0.1 秒から 2.0 秒まで変化させ、粘性ダンパーは $h_v=0.05$, 0.20 の時の累積エネルギーを図-7 に示す。

ロッキングを考慮している B, C モデルと、考慮していない A モデルにおいて、累積エネルギーに大きな差がある。粘性ダンパー $h_v=0.05$ の場合、建物の固有周期 T_s が 0.8 秒の時、約 4 倍も異なっている。すなわち、建物に入力されるエネルギーが約 4 倍ということになる。地盤の固有周期 T_g が 0.8 秒の前後では、ロッキングを考慮していないと過大評価をしてしまう恐れがある。また、粘性ダンパーの減衰定数が増加すると、累積エネルギーの最大値は、建物の固有周期 T_s が 0.8 秒から約 1.0 秒に移動している。

4. まとめ

以上より、基礎固定モデルと相互作用モデルを用い、地震応答解析からロッキングの考慮及び建物と地盤との動的相互作用の考慮についての比較を行った。結論は、次のようにまとめられる。

相互作用を考慮していない場合

- ・変位応答については、粘性ダンパーがない場合、建物の固有周期が地盤の固有周期に近いと、変位応答を大きく評価してしまう可能性がある。また、長周期になってくると、小さく評価してしまう可能性がある。

- ・粘性ダンパーについては、減衰定数が増すにつれ、基礎固定モデル及び相互作用モデルの最大応答変位の差が小さくなるが、ロッキングの影響が強いと考えられる時は、短周期側で過小評価する可能性がある。

- ・応答低減率については、建物の固有周期が地盤の固有周期を超えた辺りを境にして、短周期

側では、粘性ダンパーの応答低減効果を高く評価してしまい、逆に、長周期側では、低減効果を低く評価してしまう可能性がある。

- ・エネルギーについては、地盤の固有周期の前後では、ロッキングを考慮していないと、建物に入力される地震動のエネルギーを過大評価してしまう恐れがある。

なお、この研究に関して、地盤の質量の仮定、地盤の減衰定数の算定方法、地盤増幅特性の考慮など多くの課題を残しているため、さらに検討を続ける必要がある。今後は、建物及び地盤に非線形性の導入、多質点系モデルへの拡張など、さらに詳細な現象を表現できることも必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省建築研究所編著：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景, 2001, pp86-89
- 2) 日本建築学会他：第7回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム ―動的相互作用を考慮した耐震設計法―, 2003
- 3) 中野清司：プレキャストプレストレス工法による損失制御設計, パッシブ制振構造シンポジウム 2002, pp1-6
- 4) 本村一成, 鎌田光昭, 塩原等：粘性ダンパーによる地震応答の減衰効果に及ぼす構造物と地盤の相互作用の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, 2003, pp1405-1410
- 5) 日本建築学会関東支部：鉄筋コンクリート構造の設計, pp33
- 6) 柴田明德著：最新耐震構造解析, 森北出版, pp47
- 7) 鎌田光昭：ダンパーによる減衰と地盤の逸散減衰の関係についての研究, 東京大学卒業論文, 2001