

論文 一自由度非線形構造物の地震応答の減衰特性に及ぼす地盤—建物間の動的相互作用と地盤特性の影響

大西 直毅^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：制震機構を有する構造物について、構造物と地盤の相互作用による減衰特性への影響を調べるため、粘性境界を用いた有限要素法で地盤をモデル化し、上部構造は鉄筋コンクリート構造物を対象に一質点せん断ばねモデルとして、非線形地震応答解析を行った。地盤表層のS波速度が小さい場合には基礎のロックインの影響により構造物と地盤の連成系の一次固有周期が長くなり、地震波の卓越周期から外れた。その結果、建物に入力する地震エネルギーは小さくなり、制震機構を有する構造物の応答速度が小さくなることにより単位時間当たりの制震機構のエネルギー吸収は小さくなった。

キーワード：構造物と地盤の動的相互作用, 制震機構, 減衰特性, 地震応答解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物においても近年、超高層建物や耐震補強などに制震機構を組み込むようになってきているが、設計で用いられる基礎固定モデルによる解析は相互作用による影響を考慮した場合に比べて減衰性状が変わることが予想される。筆者らは建物を非線形一質点せん断ばねモデルとし、基礎固定の場合と、S波速度を300(m/s)とした等方均質地盤との連成系の場合との比較のため地震応答解析を行ったが、高層建物の応答が若干小さくなったものの地盤の剛性が高く、相互作用による影響は小さかった¹⁾。そこで本研究では表層地盤のS波速度の違いによる建物の制震機構の特性の変化に着目し、地盤との相互作用を考慮した場合の応答について検討を行った。

2. 解析モデルについて

解析モデルは、図-1(a)に示す地盤部分を有限要素法でモデル化し、上部構造を非線形一質点せん断ばねモデルとしたモデル（以下、相互作用モデルという）とし、比較のため、図-1(b)に示す基礎固定の非線形一質点せん断ばねモデル

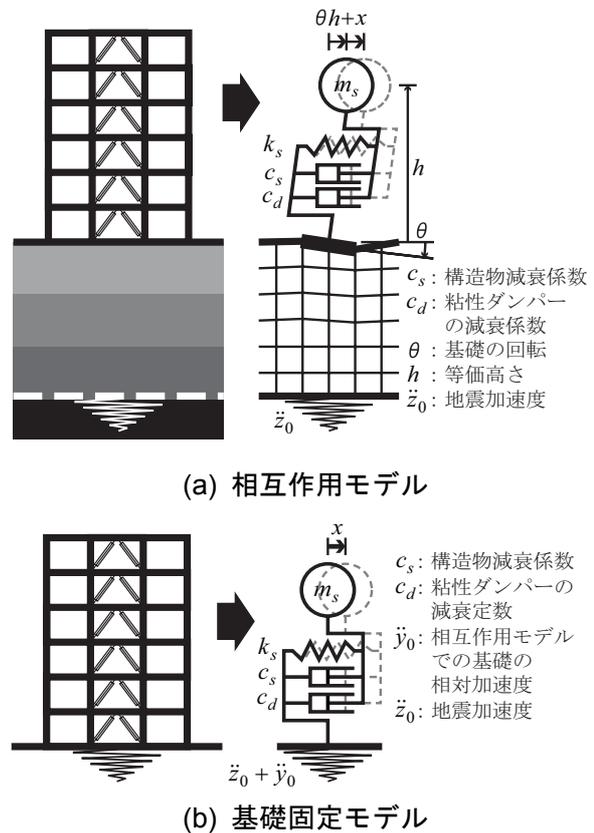


図-1 解析モデル

ル(以下、基礎固定モデルという)も用いた。

2.1 相互作用モデル

(1) 地盤モデル

相互作用モデルに用いた地盤は、有限要素法

*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建築学専攻 助教授 工博 (正会員)

による弾性の2次元平面ひずみモデルとし、四角形4節点のアイソパラメトリック要素で表す。要素分割を図-2に示し、地盤の主な定数を表-1に示す。GL.-15mまでを表層地盤1とし、GL.-15~-45mを表層地盤2とする。本研究では表層地盤2のS波速度を300[m/s]とし、表層地盤1のS波速度を変えたときの応答の変化を調べた。表-2にS波速度の設定値を示す。周囲の地盤との境界は粘性境界とし、底面には水平・鉛直両方向に、側方には水平方向のみに、以降で求めるP波速度 V_p 、S波速度 V_s に基づく粘性減衰を与えている²⁾。有限要素の地盤領域の外側は固定となっており、側方から地盤領域内へのエネルギーの流入はない。また、本研究では地盤を2次元としているためにそのままでは粘性境界による逸散減衰の効果が小さいこと、地震応答解析では極めて稀に発生する大地震を想定しているため、内部粘性減衰として25%を与えることにした。

解析では地盤の深さを45m、全幅を78m、奥行を20mとしている(図-2)。構造物の基礎は剛体であり、解析上、地盤の一部を剛体とすることでモデル化した。基礎幅は12m、奥行は20m、単位面積当たりの質量は2.0tとし、基礎の全質量は480tである。

(2) 建物モデル

建物は3階建てから15階建てまでの13種類を解析した。一層を216tとする多質点系を一質点系に縮約しており、その等価高さおよび等価質量は逆三角形の1次固有モードが主体的になるとして式(1)に基づく³⁾。

$$m_s = \frac{3N(N+1)}{2(2N+1)} m_0, \quad h_s = \frac{2N+1}{3} h_0 \quad (1)$$

ここに、 m_0 は一層分の質量、 h_0 は階高で3.33m、 N は階数である。相互作用モデルでは等価高さ h_s に応じて基礎への転倒モーメントが働く。建物の一次固有周期は $0.02 \times$ (建物高さ)とし、これにあわせて弾性剛性を設定した。

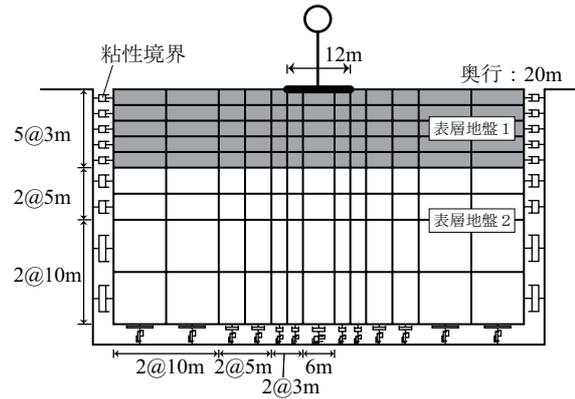


図-2 地盤領域分割

表-1 地盤の主な定数

S波速度, V_s	表-2 参照
密度, ρ	1.7 [t/m ³]
ポアソン比, ν	0.4
地盤の内部粘性減衰定数, h_g	0.25

表-2 S波速度の設定 [単位: m/s]

解析ケース	1	2	3	4	5
GL.0.0m~-15.0m	60	120	180	240	300
GL.-15.0m~-45.0m	300				
GL.-45.0m以深	400				

構造物は履歴特性にTakedaモデルを用いる一質点せん断ばねモデルとし、相互作用モデルでの減衰定数は瞬間剛性比例型で2%とした。降伏強度は式(2)によるものとし、ひび割れ強度はその1/3とする。

$$f_y = Z \cdot R_t \cdot C_B \cdot m_s g \quad (2)$$

ここに、 Z は地域係数で1.0、 R_t は振動特性係数、 C_B は設計限界検討用標準ベースシャー係数で0.3、 g は重力加速度である。

構造物に付加する粘性ダンパーは減衰定数を0%から5%ごとに20%まで変えて解析を行った。粘性ダンパーの減衰は初期剛性比例型で与え、構造物の塑性化が進んでも減衰係数は一定としている。

2.2 基礎固定モデル

基礎固定モデルは相互作用モデルの建物モデ

ルと同じ履歴特性を有し、減衰定数も同じく瞬間剛性比例型で2%を与えた。

3. 相互作用モデルの応答性状

はじめに相互作用モデルにおいて地盤の側方境界の鉛直方向および底面境界の水平鉛直両方向を固定した場合の建物-地盤連成系の一次固有周期について調べた(図-3)。相互作用モデルは低層建物では建物-地盤連成系の一次固有周期が地盤の一次固有周期に近づき、高層建物では基礎のロッキングの影響により、基礎固定モデルと比べて一次固有周期が長くなり、また、表層地盤1が軟弱なほど基礎のロッキングは大きく、 $V_s=60(\text{m/s})$ のときには15階建てで2.87秒となった。

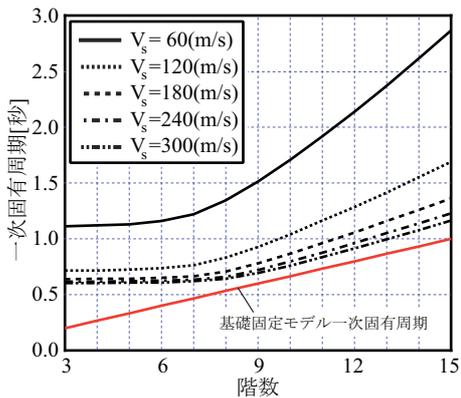


図-3 相互作用モデルの一次固有周期

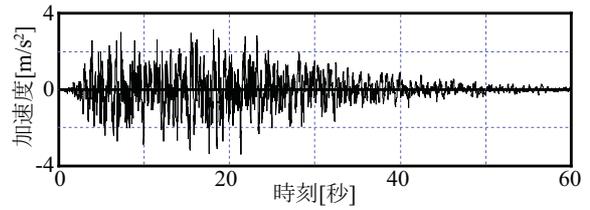
4. 地震応答解析

4.1 入力地震波の作成

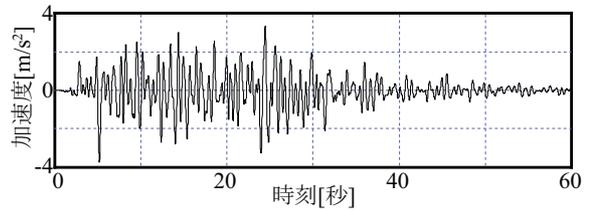
入力する地震波は模擬地震波とし、正弦波合成法により5波作成した(図-4(a))。目標加速度応答スペクトルは建設省告示1461号に示された解放工学的基盤における極めて稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルとし、フーリエ位相スペクトルは一様乱数で与え、強度関数はJennings型とした。入力地震波の時間刻みは0.01秒とし、時間は60秒とした。これらの地震波を入力して得られたデータの平均を用いる。

4.2 地震波の入力

解析時間は60秒、積分刻みは0.01秒とした。相互作用モデルでは、地盤要素の最下部に模擬地震波を水平一方向で入力した。

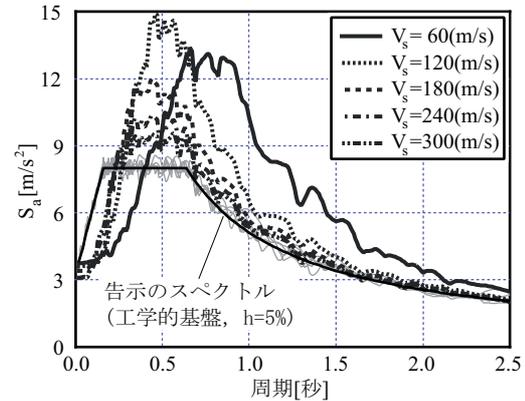


(a) 模擬地震動

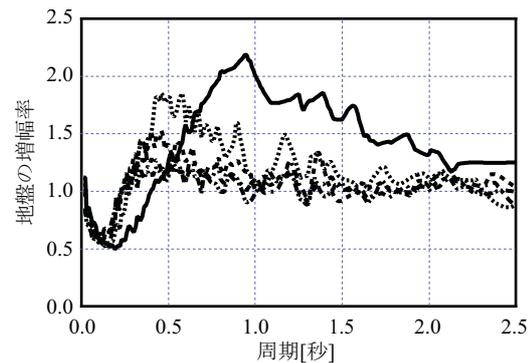


(b) 基礎の水平応答加速度 ($V_s=60(\text{m/s})$)
(基礎固定モデルの入力地震動)

図-4 入力地震波の時刻歴波形



(a) 加速度応答スペクトル



(b) 地盤の増幅率

図-5 地盤の増幅特性

基礎固定モデルでは、基礎位置における地震加速度が相互作用モデルとほぼ等しくなるよう、相互作用モデルと同じ条件で質量のある基礎を有する地盤の最下部に水平一方向に模擬地震動を入力したときの基礎の水平加速度成分(図-4(b))を入力地震波とし、基礎のロッキング成分

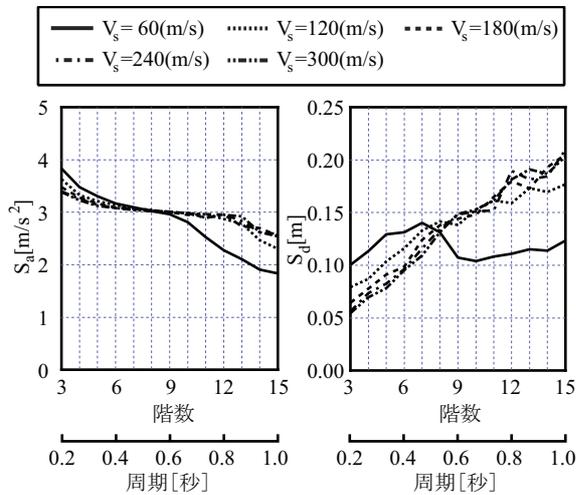
は無視した。基礎固定モデル用の入力地震波は図-5(a)に示すように地盤の S 波速度によって増幅のピークとなる周期，増幅の度合いが異なっており，表層地盤 1 の S 波速度 V_s が大きくなるにつれ，図-5(b)に示す入力地震波の加速度応答スペクトルに対する基礎の水平加速度応答スペクトルの比（以下，増幅率と呼ぶ）は小さくなった。また， $V_s=60[m/s]$ では増幅率は大きい，増幅のピークとなる周期が地盤要素の最下部に入力した模擬地震波の卓越周期から外れているために $V_s=120[m/s]$ のとき加速度応答スペクトルが最大となっている。

4.3 応答解析結果

相互作用モデルの応答変位はロッキング成分を除いた基礎からの相対水平変位とし，等価高さにおける値とする。

(1) 相互作用モデルの最大応答

最大応答加速度および最大応答変位について粘性ダンパーなしでの比較を行った（図-6）。いずれの地盤においても高層建物ほど最大応答加速度は小さくなる傾向が見られ， $V_s=60[m/s]$ で特にこの傾向が顕著であった。この傾向は最大応答変位を見るとよりはっきりと現れていることがわかるが，図-3に示したように，地盤が軟らかいケースではロッキングの影響により連成系の一次固有周期が長くなり，入力地震動のピークから外れるためと考えられる。



(a) 最大応答加速度 (b) 最大応答変位
図-6 相互作用モデルでの建物の最大応答

(2) 粘性ダンパーによる応答の低減

粘性ダンパー無付加時 ($h_d=0\%$) の応答に対する比について，地盤ごとにモデルによる比較を行った。図-7，図-8に相互作用モデルおよび基礎固定モデルの応答加速度，応答変位に関する $h_d=0\%$ の応答に対する比を示す。また，図-9は図-8の元となる粘性ダンパーを付加した時の最大応答変位を示すグラフである。応答加速度についてはいずれのモデルも低層建物では粘性ダンパーを付加するほど最大応答加速度は大き

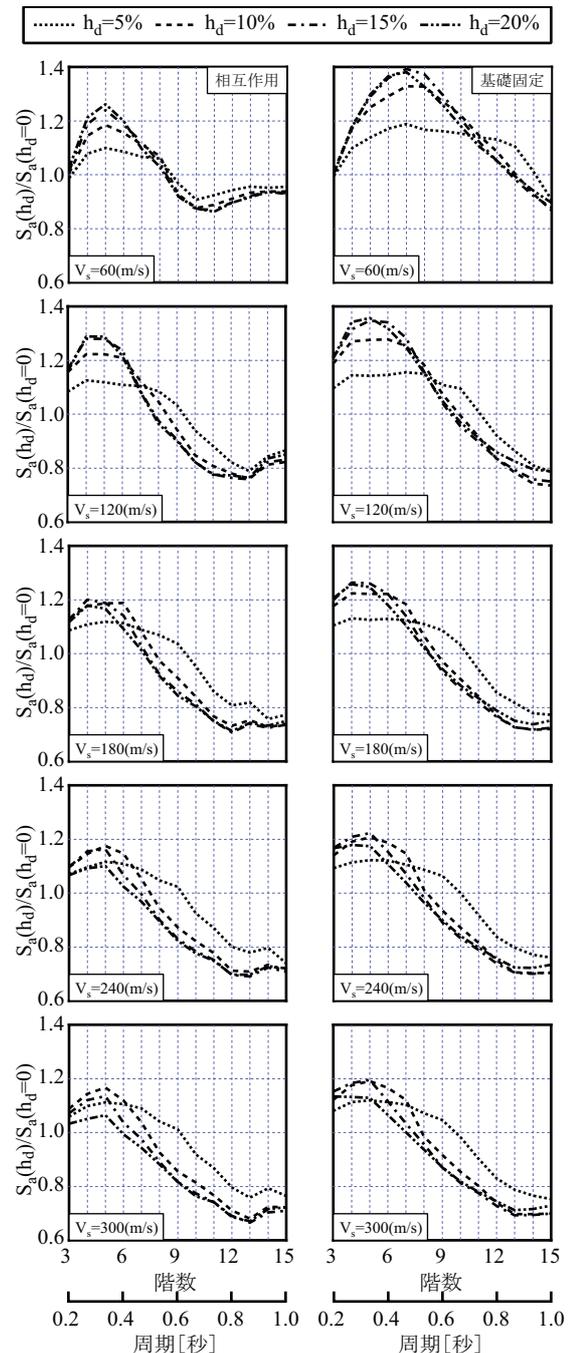


図-7 $h_d=0\%$ の場合に対する応答加速度の比

くなっており、 $V_s=60(\text{m/s})$ では基礎固定モデルの方がその傾向が強く見られるのに対し $V_s=300(\text{m/s})$ では両モデルの応答低減効果はほぼ等しい。一方、応答変位は両モデルとも $V_s=60(\text{m/s})$ では高層建物ほど応答低減効果が小さい傾向があり、相互作用モデルでは殆ど低減効果は見られないが、図-9を見ると、そもそも相互作用モデルでは基礎固定モデルよりも応答変位が小さいため、粘性ダンパーによる応答低減が生じにくくなっていることがわかる。表層地盤 1 が硬いほど低

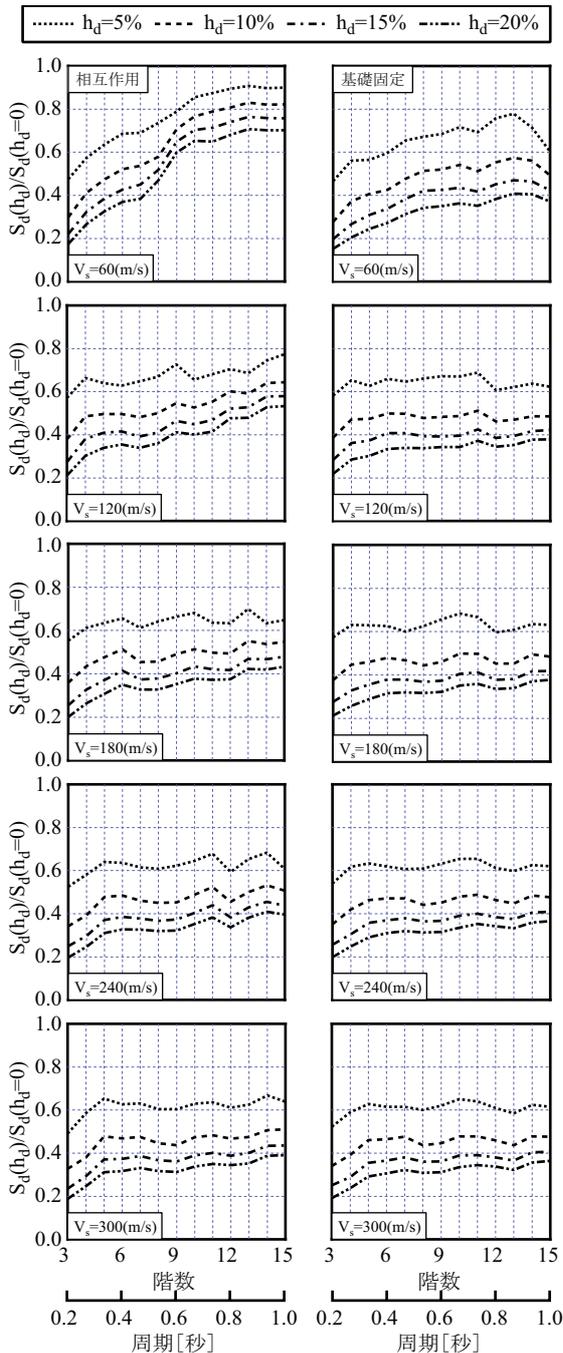


図-8 $h_d=0\%$ の場合に対する応答変位の比

減効果は大きく、 $V_s=300(\text{m/s})$ ではいずれのモデルでも $h_d=20\%$ のときに 0.2~0.3 程度まで応答が低減されている。また、地盤が硬くなるにつれ、モデル同士の差は小さくなり、相互作用モデルに対する基礎固定モデルの最大応答変位の比は、最小でも $h_d=20\%$ のときに 1.02 であった (図-9)。

(3) 累積吸収エネルギー

粘性ダンパーによる吸収エネルギーについて、60 秒間の累積吸収エネルギー E_d を調べた。図-

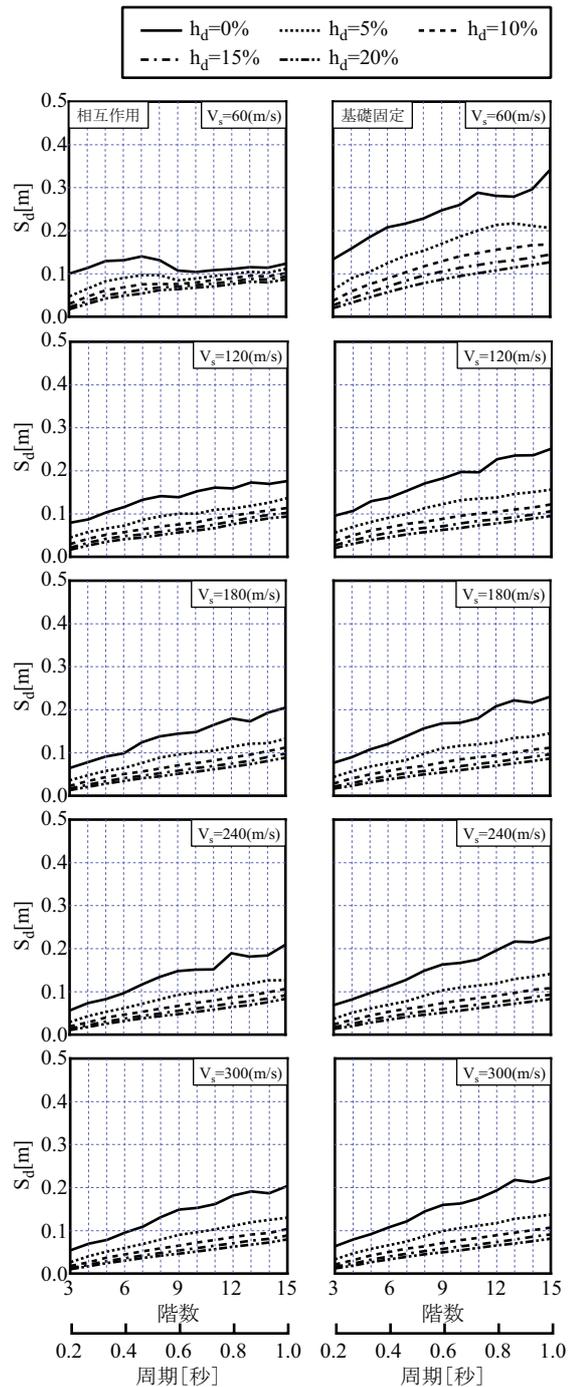


図-9 粘性ダンパー付加時の最大応答変位

10に、建物の等価質量 m_s で基準化した単位質量当たりの累積吸収エネルギーを示す。

基礎固定モデルでは地盤が軟らかいほど単位質量当たりの累積吸収エネルギーは大きいですが、相互作用モデルでは基礎固定モデルほどのエネルギー吸収はなく、最も一次固有周期の伸びのある $V_s=60(\text{m/s})$ のケースの高層建物の両モデルの累積吸収エネルギーの差が最も大きい。これは一次固有周期が伸びることで、相互作用モデルの応答速度が小さくなり、単位時間当たりの粘性吸収エネルギーが小さくなるためと考えら

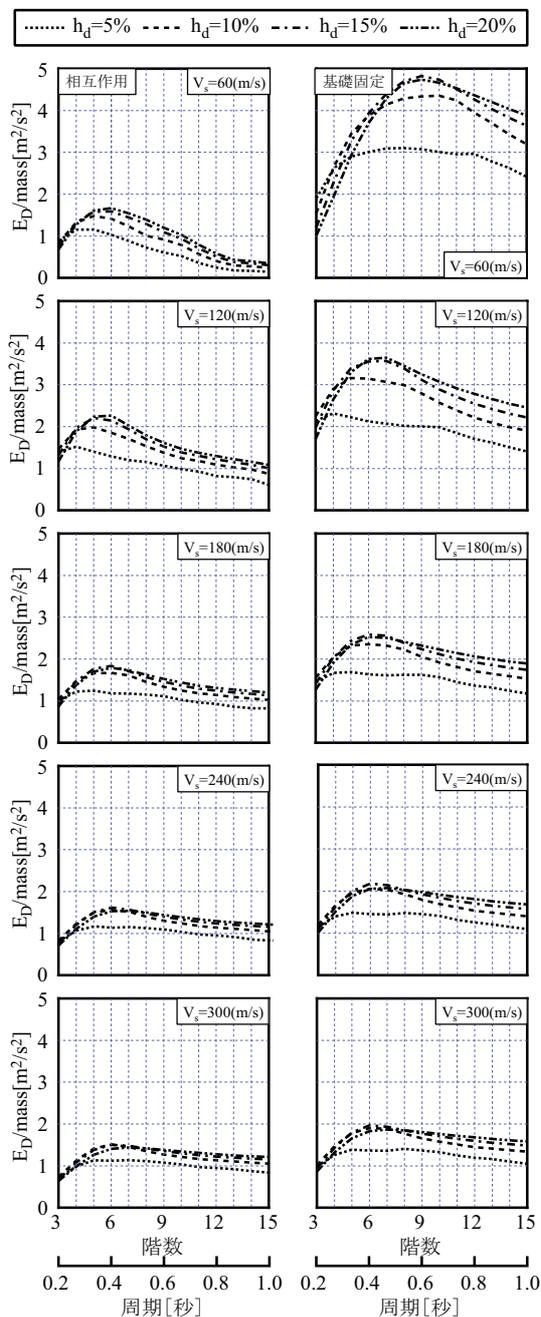


図-10 単位質量当たりの累積吸収エネルギー

れる。

5. まとめ

構造物と地盤の相互作用を考慮した制震建物の応答を地盤の S 波速度の異なる 5 ケースについて検討した。以下に得られた結論をまとめる。

- (1) 相互作用モデルでは高層建物ほどロッキングの影響で一次固有周期が長くなり、地盤が軟らかい場合には特にその傾向が強く、振動の一次固有周期が地震波の卓越周期から外れ、建物への加速度の入力が小さくなることもある。
- (2) 地盤が硬い場合にはモデルによる違いは殆どないが、地盤が軟らかい場合には、特に高層建物で、 $h_d=0\%$ での応答に対する比は基礎固定モデルの方が相互作用モデルよりも 2 割以上低い。しかしながら相互作用モデルに対し基礎固定モデルの最大応答変位が常に上回っているため、結果的にいずれの場合にも建物の変形量は設計上安全側になっている。
- (3) 粘性ダンパーの累積吸収エネルギーは、基礎固定モデルでは地盤が軟らかいほど大きいのに対し、相互作用モデルでは地盤が軟らかいほどロッキングの影響により一次固有周期が伸び、単位時間当たりの粘性吸収エネルギーが基礎固定モデルに比べ小さくなり、地盤の硬軟による違いは殆ど見られなかった。

参考文献

- 1) 塩原等・大西直毅：有限要素法による一自由度非線形構造物の減衰特性に及ぼす動的相互作用の効果の検討，第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，Paper No.0137，2006.11
- 2) 土木学会編：動的解析と耐震設計 第 2 巻 動的解析の方法，技報堂出版，pp.117-118，1989.7
- 3) 柴田明德：最新 耐震構造解析 第 2 版，森北出版，pp.78，2003.5